

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

ANALYSE DES FACTEURS DE LA VARIABILITÉ SPATIALE  
DE LA LARGEUR À PLEIN BORD ET DE LA SINUOSITÉ  
DES CHENAUUX AU QUÉBEC MÉRIDIONAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR  
PATRICE DELISLE

AOÛT 2020

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

## COMITÉ DÉVALUATION

### **Directeur de recherche**

Ali A. Assani (Ph. D.)

Centre de recherche sur les interactions bassins versants-écosystèmes aquatiques (RIVE)

Membre régulier

Département des sciences de l'environnement

Université du Québec à Trois-Rivières

C.P. 500, Trois-Rivières (Québec)

G9A 5H7

### **Membres du comité d'évaluation**

Denis Leroux (Ph. D.)

Chercheur GIRAS (Groupe Interdisciplinaire de Recherche Appliquée en Santé)

Centre de recherche sur les interactions bassins versants-écosystèmes aquatiques (RIVE)

Membre associé

Département des sciences de l'environnement

Université du Québec à Trois-Rivières

C.P. 500, Trois-Rivières (Québec)

G9A 5H7

Christophe Kinnard (Ph. D.)

Centre de recherche sur les interactions bassins versants-écosystèmes aquatiques (RIVE)

Membre régulier

Département des sciences de l'environnement

Université du Québec à Trois-Rivières

C.P. 500, Trois-Rivières (Québec)

G9A 5H7

## REMERCIEMENTS

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur de maîtrise, le professeur Ali A. Assani, du Département des sciences de l'environnement de l'Université du Québec à Trois-Rivières de m'avoir offert l'opportunité de travailler avec lui sur un projet aussi motivant, mais aussi pour sa grande disponibilité et compréhension tout au long de ce travail, ainsi que de m'avoir permis de poursuivre mes études aux cycles supérieurs.

Je remercie également les professeurs Christophe Kinnard et Denis Leroux du Département des sciences de l'environnement de l'Université du Québec à Trois-Rivières d'avoir accepté de faire partie de mon comité d'évaluation et ainsi participer à l'amélioration de ce travail tout au long du processus.

J'aimerais aussi remercier Jean-François Quessy pour sa contribution aux outils informatiques ayant permis de réaliser les analyses statistiques, à Pierre-André Bordeleau pour ses précieux conseils et son aide durant tout mon cursus universitaire ainsi qu'à tous mes collègues et enseignants du Département de sciences de l'environnement, avec qui j'ai pu échanger et recevoir d'aide dans les cas d'impasses. Un remerciement très spécial aussi à Catherine et tout le personnel de la cartothèque qui m'ont offert une aide sans pareil pour l'acquisition de mes données.

En terminant, je tiens à remercier mes parents, Francis, mon frère, qui m'a fait découvrir cette discipline et qui m'a énormément aidé, puis ma conjointe Geneviève, qui a toujours été là pour moi et compréhensive, peu importe la situation, merci!

## RÉSUMÉ

Les inondations résultent de l'influence des plusieurs facteurs climatiques, physiographiques, morphologiques et anthropiques. En géomorphologie fluviale, la relation entre la morphologie des chenaux et les débits de rivières a été analysée dans le cadre de la théorie de la géométrie hydraulique. Celle-ci n'a jamais été appliquée au Québec méridional. L'objectif de notre travail était de vérifier cette théorie en analysant les facteurs de la variabilité spatiale de la moyenne de la largeur à plein bord et de la sinuosité de 49 rivières réparties sur les trois régions physiographiques du Québec méridional : le Bouclier canadien, les Appalaches et les Basses-terres du Saint-Laurent. L'analyse de Lombard a révélé que 45 % des rivières analysées sont caractérisées par une hausse significative longitudinale (de l'amont vers l'aval) de la moyenne de la largeur à plein bord et 31 % par une baisse significative de cette moyenne. Cette diminution est due à la présence des bancs et des îlots dans les biefs amonts des rivières. Aucun changement significatif de cette moyenne n'a été observé pour 21 % des rivières analysées. L'analyse canonique des corrélations a mis en évidence un lien relativement élevé entre les moyennes de la largeur à plein bord et les superficies des bassins versants ainsi que les débits de récurrence de deux ans. Les relations entre ces variables sont décrites par des régressions de type puissance. Les valeurs de pentes de ces régressions sont plus élevées que celles calculées dans les autres régions du monde notamment aux États-Unis alors que celles des ordonnées à l'origine sont plus faibles. Quant à la sinuosité, on n'a pas observé de différence significative de la sinuosité moyenne des rivières entre les trois régions physiographiques, révélant ainsi sa faible sensibilité à la différence de la lithologie de ces trois régions. Cette variable peut aussi être décrite au moyen de la fonction puissance. Toutefois, les coefficients de détermination de ces fonctions sont beaucoup plus faibles que ceux calculés pour les moyennes de la largeur en plein bord. Couplées aux données de la profondeur moyenne à pleins bords des chenaux, les valeurs de la largeur moyenne à pleins bords calculées dans le cadre de ce travail pourraient servir à déterminer les secteurs des chenaux plus sensibles aux débordements des eaux, c'est-à-dire aux inondations.

**Mots-clés :** largeur à plein bord, sinuosité, superficies des bassins versants, débits, caractéristiques physiographiques, test de Lombard, analyse canonique des corrélations, Québec méridional.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>COMITÉ DÉVALUATION .....</b>	<b>ii</b>
<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>iii</b>
<b>RÉSUMÉ.....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>ix</b>
<b>CHAPITRE I</b>	
<b>CONTEXTE DE LA RECHERCHE À L'ÉCHELLE DU QUÉBEC .....</b>	<b>1</b>
1.1 Introduction.....	1
1.2 Analyse des facteurs de la variabilité et des changements climatiques sur les crues et les inondations au Québec méridional .....	6
1.3 Estimation des débits de crues et d'inondations au Québec méridional.....	9
1.4 Impacts anthropiques sur les crues et les inondations au Québec méridional ....	10
1.5 Influence des facteurs physiographiques des bassins versants sur les débits de crues et d'inondations .....	11
1.6 Influence des caractéristiques morphologiques des chenaux sur les débits de crues et d'inondations au Québec méridional.....	11
<b>CHAPITRE II</b>	
<b>CADRE THÉORIQUE, PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE .....</b>	<b>13</b>
2.1 Énoncé et objectif de la théorie de la géométrie hydraulique (GH) .....	13
2.1.1 La théorie de géométrie hydraulique à une seule station (AGH) .....	16
2.1.2 La théorie de la géométrie hydraulique longitudinale (DGH).....	17
2.1.3 La théorie de la géométrie hydraulique à de nombreuses stations (AMHG).....	19
2.2 Apports de la théorie de la géométrie hydraulique.....	20
2.3 Étude de la largeur des chenaux dans le cadre de la théorie de la géométrie hydraulique .....	21
2.4 Étude de la sinuosité dans le cadre de la théorie hydraulique .....	24
2.5 Problématiques, objectifs et originalité de l'étude .....	26

<b>CHAPITRE III</b>	
<b>MÉTHODOLOGIE .....</b>	<b>30</b>
3.1 Description de la région d'étude et justification du choix des stations analysées.....	30
3.2 Description des variables analysées.....	37
3.2.1 Les variables hydrologiques .....	37
3.2.2 Les variables physiographiques .....	39
3.2.2.1 Analyse cartographique .....	40
3.2.3 Calcul de la sinuosité .....	43
3.3 Analyses statistiques des données .....	44
3.3.1 Méthode d'analyse de la variabilité longitudinale de la moyenne de la largeur à plein bord .....	44
3.3.2 Analyse de la relation entre les variables morphologiques (largeur à plein bord et sinuosité et les variables indépendantes .....	46
<b>CHAPITRE IV</b>	
<b>RÉSULTATS.....</b>	<b>49</b>
4.1 Variabilité longitudinale des largeurs à plein bord.....	49
4.2 Comparaison des moyennes de la sinuosité des trois régions physiographiques	54
4.3 Relation entre les facteurs physio-climatiques et les variables morphologiques	56
4.4 Analyse de régressions .....	57
4.4.1 Largeur à plein bord.....	57
4.4.2 Sinuosité.....	61
4.5 Comparaison avec les données des autres régions du monde.....	66
4.6 Un exemple d'application de la théorie de la géométrie hydraulique : estimation des moyennes de la largeur à plein bord en aval des barrages.....	68
4.7 Discussion.....	70
<b>CHAPITRE V</b>	
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>72</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>75</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
2.1 Synthèse des principaux facteurs et tendances probables de leurs impacts sur la largeur des chenaux (Anderson et al., 2004).....	22
2.2 Exemples d'équations reliant la largeur à plein bord des chenaux aux superficies des bassins versants et aux débits à plein bord dans le Nord-Ouest des États-Unis (Castro et Jackson, 2001).....	24
2.3 Relation qualitative entre les débits (liquide et solide) et les variables morphologiques (Schumm, 1969).....	26
3.1 Caractéristiques des rivières analysées .....	34
3.2 Les valeurs des paramètres de la loi de Valeurs Extrêmes Généralisées (GEV) régionalisées dans les trois régions hydrologiques homogènes .....	38
4.1 Variabilité longitudinale de la largeur à plein bord – Résultats du test de Lombard .....	52
4.2 Comparaison de la fréquence (%) de types de changements des moyennes de la largeur à plein bord en fonction des régions physiographiques au Québec méridional – Résultats du test de Lombard .....	54
4.3 Comparaison des moyennes de la sinuosité des rivières de trois régions physiographiques – Résultats de l'analyse de variance avec un seul critère de classification.....	55
4.4 Moyennes et écarts types de la sinuosité pour les trois régions physiographiques .....	56
4.5 Coefficients de structure calculés entre les groupes des variables dépendantes et indépendantes .....	57
4.6 Valeurs des paramètres de la fonction puissance calculés entre la sinuosité (S) et la superficie des bassins versants ( $S = aDA^b$ ) ainsi que la sinuosité et les débits de récurrence deux ans ( $S = aQ_2^b$ ) au Québec .....	66
4.7 Valeurs des paramètres de la fonction puissance ( $w = aDA^b$ ) calculés entre la moyenne de la largeur à plein bord (w) et la superficie des bassins versants (DA) au Québec – Comparaison avec les données des États-Unis.....	67



4.8	Valeurs des paramètres de la fonction puissance ( $w = aQ_2^b$ ) calculés entre la moyenne de la largeur à plein bord ( $w$ ) et les débits de récurrence deux ans ( $Q_2$ ) au Québec – Comparaison avec les données des autres régions .....	68
4.9	Comparaison des moyennes de la largeur à plein bord mesurées et estimées	69

## LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1.1	Évolution du nombre total des désastres d'origine hydrométéorologique ( <a href="https://www.emdat.be/index.php">https://www.emdat.be/index.php</a> ).....	2
1.2	Nombre total des décès provoqués par les catastrophes d'origine hydrométéorologique (WMO, 2014: Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes [1970-2012]. WMO-No. 1123, 48 p.).....	3
1.3	Nombre total des décès provoqués par les catastrophes d'origine hydrométéorologique (Source: WMO, 2014: Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes [1970-2012]. WMO-No. 1123, 48 p.).....	3
1.4	Dommages moyens annuels (en milliards de dollars \$) estimés par continent (EM-Data: The OFDA/CRED International database – <a href="https://www.emdat.be/">https://www.emdat.be/</a> ).....	4
1.5	Fréquence des différentes catastrophes naturelles au Canada pendant la période 1900-2011 (G. McBean, 2013) .....	4
1.6	Fréquence d'inondation dans les différentes villes du Québec de 1642 à 2016 (Mayer-Jouanjan et Logan, 2016) .....	5
1.7	Interactions des facteurs affectant les crues dans un bassin versant.....	6
2.1	Les relations hypothétiques entre AHG et DHG sont données pour cet exemple de chenal avec deux tributaires.....	16
2.2	Relation empirique entre les débits à plein bord et la largeur ainsi que la profondeur moyenne des chenaux (Knighton, 1998).....	29
3.1	Régions hydrologiques homogènes définies par Anctil (1998).....	31
3.2	Distribution des bassins versants à l'étude dans les trois régions physiographiques .....	32
3.3	Répartition des stations hydrométriques dans les régions physiographiques .....	33
3.4	Exemple cartographique de la vectorisation de la limite supérieure des chenaux .....	41

3.5	Classe d'entité linéaire représentant chaque rive du chenal (valeur 1 et 3) et l'axe médiant créée (valeur de 2).....	42
3.6	Étapes pour générer automatiquement les segments perpendiculaires .....	43
4.1	Variabilité longitudinale de la largeur à plein bord de la rivière Eaton .....	50
4.2	Vue en plan de la variabilité longitudinale de largeur à plein bord de la rivière Eaton.....	50
4.3	Variabilité longitudinale de la largeur à plein bord de la rivière Maskinongé.....	51
4.4	Vue en plan de la variabilité longitudinale de largeur à plein bord de la rivière Maskinongé .....	51
4.5	Comparaison des moyennes de la sinuosité des rivières des trois régions physiographiques au moyen de l'analyse de variance à un seul critère.....	55
4.6	Relation entre la superficie des bassins versants et la moyenne de la largeur à plein bord dans les trois régions physiographiques.....	58
4.7	Relation entre la superficie et la moyenne de la largeur à plein bord pour chaque région physiographique .....	59
4.8	Relation entre le débit de récurrence de deux ans et la moyenne de la largeur à plein bord dans les trois régions physiographiques.....	60
4.9	Relation entre le débit de récurrence de deux ans et la moyenne de la largeur à plein bord .....	61
4.10	Relation entre la superficie des bassins versants et la sinuosité dans les trois régions physiographiques .....	62
4.11	Relation entre la superficie des bassins versants et la sinuosité pour chaque région physiographique.....	63
4.12	Relation entre les débits de récurrence de deux ans et la sinuosité dans les trois régions physiographiques .....	64
4.13	Relation entre le débit de récurrence de deux ans et la sinuosité dans chaque région physiographique.....	65
4.14	Relation entre la superficie du bassin versant et la moyenne de la largeur à plein bord des rivières naturelles et régularisées.....	69

## CHAPITRE I

### CONTEXTE DE LA RECHERCHE À L'ÉCHELLE DU QUÉBEC

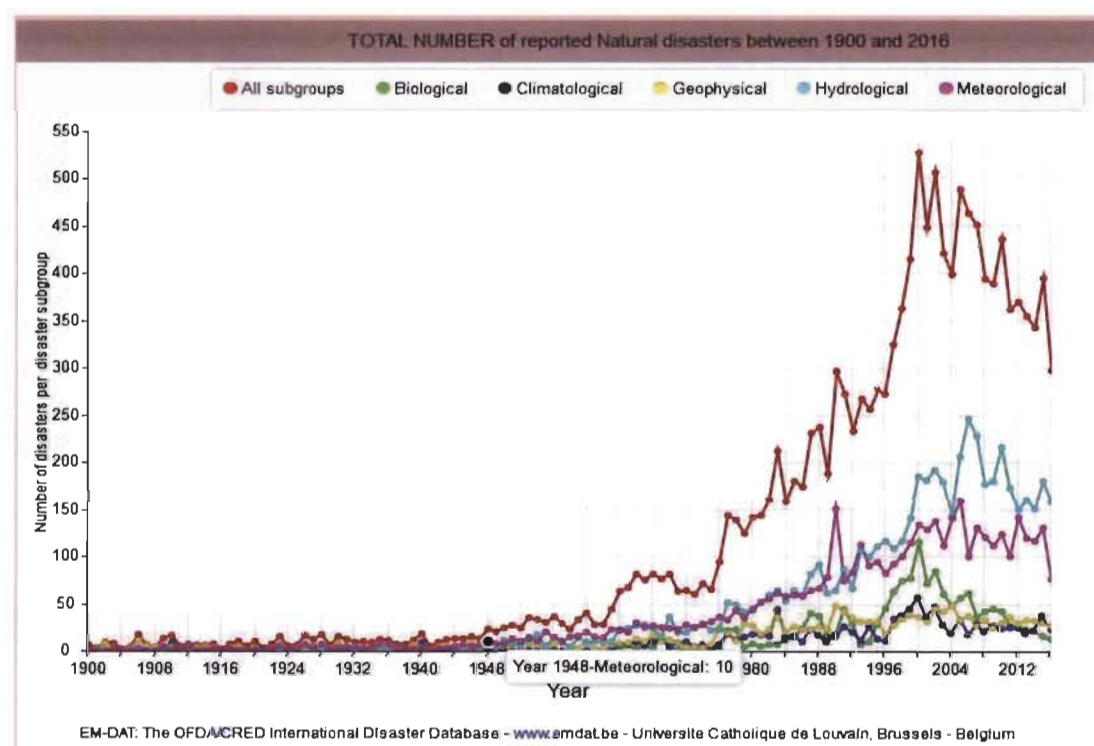
#### 1.1 Introduction

Il devient de plus en plus évident qu'un des impacts majeurs de changements climatiques se traduira par l'amplification des phénomènes hydrométéorologiques extrêmes (pluies diluviennes, tempêtes, tornades, canicules, ouragans, inondations, sécheresse, etc.). De fait, comme le révèle la figure 1.1, le nombre des désastres provoqués par ces phénomènes a significativement augmenté depuis 1980.

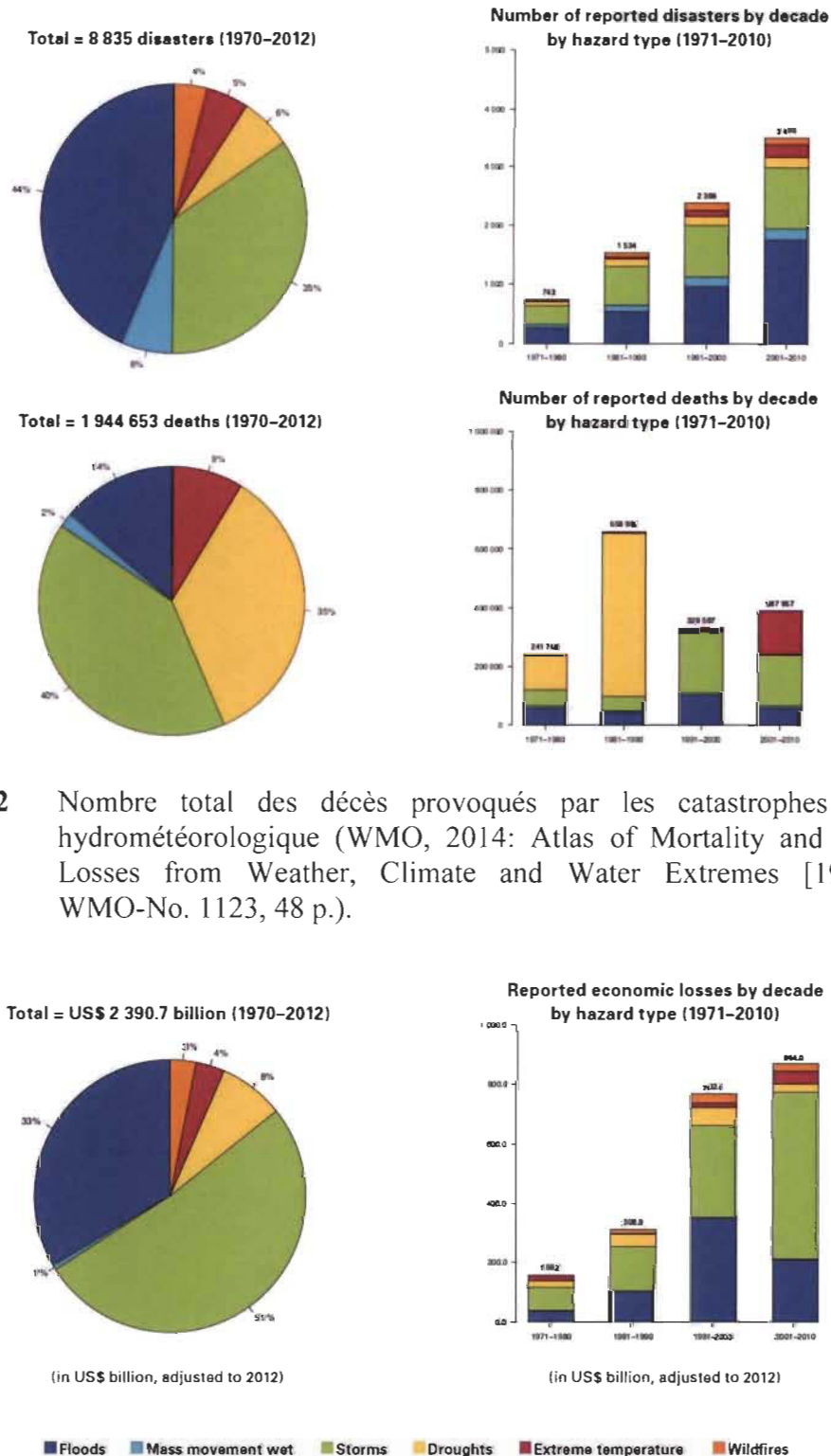
Ces désastres ont sans nul doute provoqué des pertes matérielles et humaines de plus en plus importantes (Figures 1.2 et 1.3) sur tous les continents (Figure 1.4). Il va de soi que le Canada n'y a pas échappé (Figure 1.5). Sur le plan hydrologique, les désastres provoqués par les inondations ou des crues de rivières ont ainsi significativement augmenté partout dans le monde. Les inondations sont devenues même la première cause des catastrophes naturelles dans de nombreux pays. Les dégâts causés par ce phénomène hydrologique sont souvent spectaculaires et très onéreux à la société. Ainsi, de nombreuses études sont de plus en plus consacrées aux crues et aux inondations dans de nombreux pays au monde. De nombreux articles scientifiques sur ce sujet sont régulièrement publiés dans les revues spécialisées, les ouvrages et les médias de masse. La recension de tous ces travaux dépasserait largement le cadre de ce travail de maîtrise. C'est la raison pour laquelle on se limitera seulement aux travaux qui ont été déjà publiés sur les crues et les inondations au Québec.

À l'instar des autres régions du monde, le Québec est régulièrement confronté aux inondations comme le montre clairement la figure 1.6. Depuis la décennie 1990, plusieurs inondations catastrophiques de diverses origines sont survenues : le déluge de Saguenay en 1996, les inondations des rivières Châteaugay et Rivière-au-Renard

(en Gaspésie) en 2007, des inondations printanières généralisées survenues en 2008, 2017 et 2019, et les inondations de la rivière Richelieu en 2009. Toutes ces inondations ont provoqué des pertes matérielles et humaines importantes. Entre 1991 et 2013, on a évalué des pertes matérielles de plus de 70 000 000\$ liées aux inondations. Entre 1900 et 2005, plus de 230 personnes ont perdu la vie en raison des inondations au Québec.

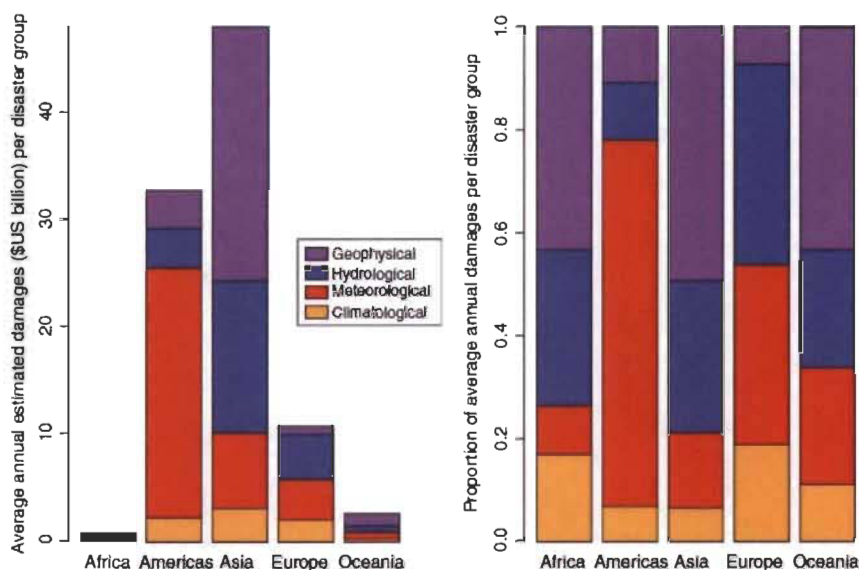


**Figure 1.1** Évolution du nombre total des désastres d'origine hydrométéorologique (<https://www.emdat.be/index.php>).



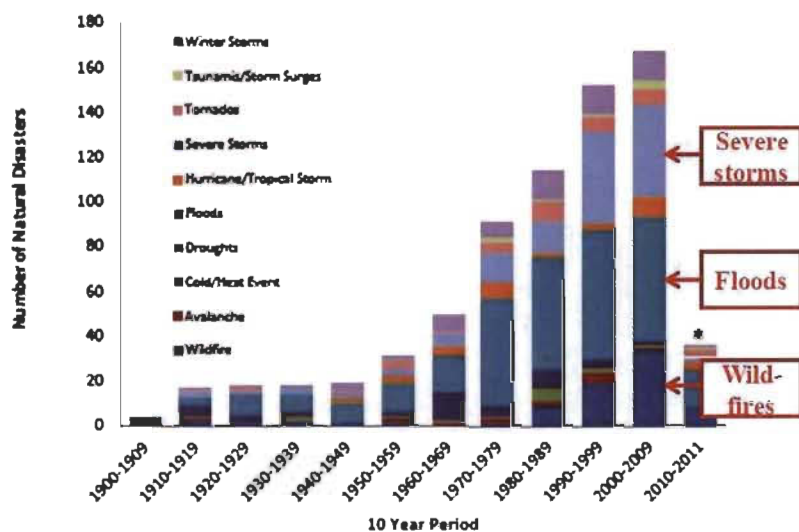
**Figure 1.2** Nombre total des décès provoqués par les catastrophes d'origine hydrométéorologique (WMO, 2014: Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes [1970-2012]. WMO-No. 1123, 48 p.).

**Figure 1.3** Nombre total des décès provoqués par les catastrophes d'origine hydrométéorologique (Source: WMO, 2014: Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes [1970-2012]. WMO-No. 1123, 48 p.).



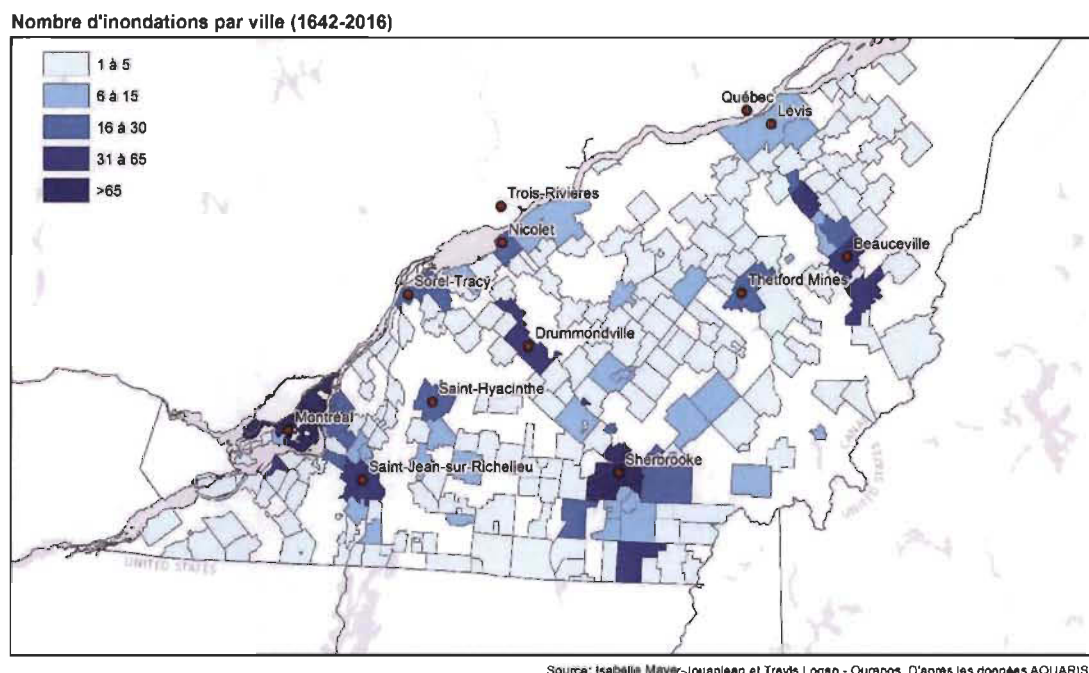
**Figure 1.4** Dommages moyens annuels (en milliards de dollars \$) estimés par continent (EM-Data: The OFDA/CRED International database – <https://www.emdat.be/>).

### Frequency of Natural Disasters in Canada (1900-2011)



\* Only two years of decade 4

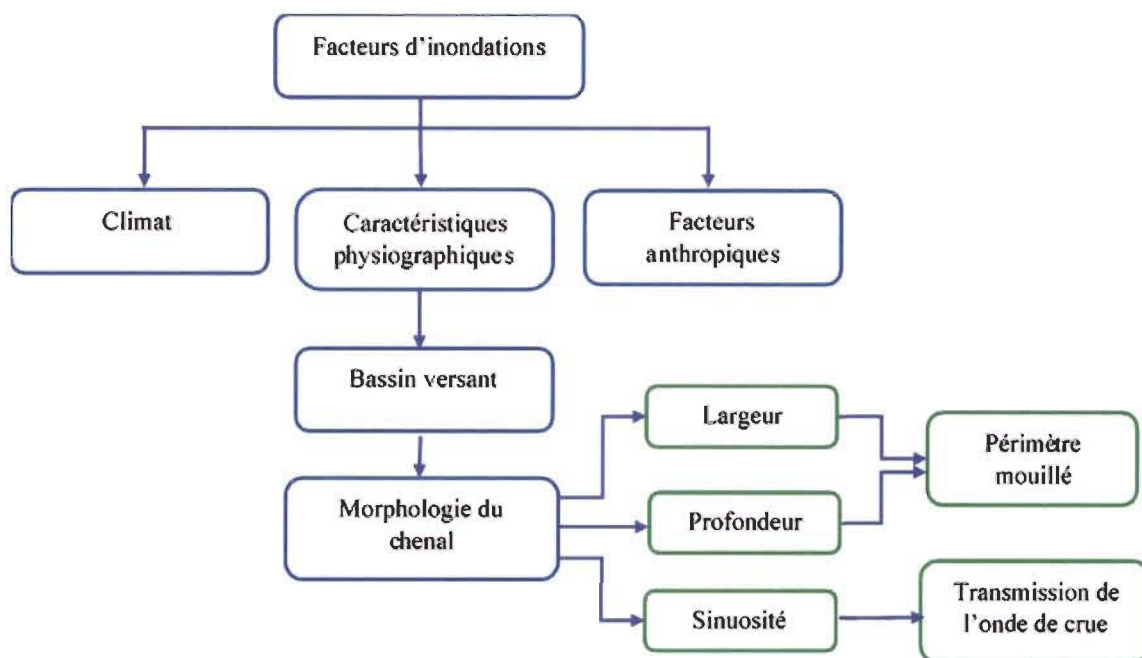
**Figure 1.5** Fréquence des différentes catastrophes naturelles au Canada pendant la période 1900-2011 (G. McBean, 2013).



**Figure 1.6** Fréquence d'inondation dans les différentes villes du Québec de 1642 à 2016 (Mayer-Jouanjean et Logan, 2016).

De manière générale, les inondations ou les crues dans un bassin versant donné résultent de l'interaction de nombreux facteurs qui peuvent être regroupés en trois familles (Figure 1.7) : les facteurs liés à la variabilité et aux changements climatiques (températures des eaux de surface océaniques, régimes des températures et des précipitations, circulation atmosphérique, conditions météorologiques, etc.), les facteurs liés aux caractéristiques physiographiques des bassins versants (nature des substrats et de lithologie, topographie, morphologie des chenaux, couverture végétale, longueur des chenaux, surface des bassins versants, variation du taux d'humidité des sols, etc.) et les facteurs anthropiques qui modifient les conditions d'écoulement de surface et de profondeur (agriculture, déforestation, barrages, urbanisation, autres aménagements hydrauliques, etc.). Dans la suite de ce travail, on procédera par une recension de tous les travaux qui ont été déjà réalisés sur ces trois groupes de facteurs qui influencent les inondations et les crues au Québec méridional.





**Figure 1.7** Interactions des facteurs affectant les crues dans un bassin versant.

## 1.2 Analyse des facteurs de la variabilité et des changements climatiques sur les crues et les inondations au Québec méridional

En raison des conditions climatiques du Québec, il faut tout d'abord mentionner que les crues et les inondations surviennent au printemps en raison de la fonte de neige et/ou des pluies (crues nivo-pluviales), en été et en automne lors des chutes importantes de pluies (p. ex., Buttle et al., 2016). Au printemps, l'intensité des crues et les désastres qui peuvent en découler peuvent être aggravés par des embâcles de glace. En ce qui concerne la variabilité du climat, il existe encore très peu de travaux sur l'influence des indices climatiques sur la variabilité spatio-temporelle des débits d'inondations et des crues au Québec. Assani et al. (2010) ont analysé la variabilité interannuelle des débits maximums journaliers annuels de 15 rivières du Québec méridional pendant la période 1934-2000 en relation avec six indices climatiques. Rappelons que ces débits surviennent principalement au printemps au moment de la fonte de neige. Après avoir regroupé ces 15 rivières en trois régions hydrologiques homogènes au moyen de l'analyse en composantes principales, en ce qui concerne la tendance à long terme, ils ont observé une hausse significative de la magnitude des débits maximums journaliers annuels seulement des

affluents du fleuve Saint-Laurent situés en rive nord. Quant au lien entre ces débits et les indices climatiques, ils étaient significativement corrélés négativement à l'Oscillation atlantique multi-Décennale (AMO) alors que les débits des affluents de la rive sud ont été corrélés respectivement aux Oscillations australe (ENSO) et arctique (AO) au nord et au sud du 47°N. Ces résultats ont été confirmés par Mazouz et al. (2012, 2013). Dans une étude récente, Assani (2017) a observé une corrélation significative positive entre la magnitude des débits maximums des crues printanières de deux rivières (Matawin et L'Assomption) de la rive nord et les indices hivernaux de l'Oscillation australe associés aux épisodes d'intensité modérée et forte de La Nina. Sur la base de ces résultats, il a suggéré que les fortes crues printanières sont généralement associées aux épisodes La Nina dans les deux bassins versants. Par ailleurs, Assani et al. (2011) ont analysé la tendance à long terme des débits maximums journaliers générés par les pluies en été et en automne en relation avec les indices climatiques dans 18 bassins versants du Québec méridional en s'appuyant sur les mêmes méthodes statistiques d'analyse, ils ont observé une hausse significative de la magnitude de ces débits seulement en rive nord. Ces débits étaient corrélés négativement à l'Oscillation atlantique multidécennale (OAM). En revanche, les débits de rivières situées au sud du 47°N en rive sud étaient corrélés à l'Oscillation arctique (OA) et ceux des rivières situées au nord de ce parallèle l'étaient à l'Oscillation australe (OAU). L'analyse des débits maximums de crues hivernales a révélé une hausse quasi généralisée de leur magnitude et leur occurrence précoce depuis la décennie 1970 à l'échelle du Québec (Beauchamp et al., 2015). La magnitude de ces débits était principalement corrélée à l'Oscillation pacifique décennale (OPD) et leur période d'occurrence à l'Oscillation nord-atlantique (ONA). En ce qui concerne le fleuve Saint-Laurent, l'analyse de la tendance à long terme des débits maximums journaliers mensuels en relation avec les indices climatiques pendant la période 1912-2010 a révélé une diminution significative de la magnitude de ces débits principalement en hiver et au printemps après 1980 en raison probablement de la diminution de la quantité de neige observée depuis la décennie 1980. Ces débits étaient significativement corrélés à l'Oscillation atlantique multidécennale (Assani et al., 2014a, 2014b).

Les conditions météorologiques de genèse de quelques graves inondations ont été analysées profondément dans le cas du déluge de Saguenay, les inondations de la Rivière-au-Renard et celles de la rivière Richelieu. Dans le cas du déluge de Saguenay, de nombreux rapports et articles scientifiques ont été publiés. En résumé, ce déluge a été provoqué par l'occurrence d'une tempête tropicale stationnaire (qui se déplace très lentement) au-dessus de la réserve faunique des Laurentides. La tempête a ainsi déversé plus de 250 mm en 50 heures dans la région. Cette quantité importante d'eau est tombée sur un sol déjà gorgé d'eau de pluies tombées du premier au 17 juillet 1996. Par conséquent, l'infiltration étant devenue quasi nulle, toute l'eau de pluie apportée par la tempête a ruisselé provoquant ainsi un véritable déluge (Tremblay, 2005). Quant à l'inondation de la Rivière-au-Renard, la région a reçu pas moins de 110 mm de pluies en douze heures dans la nuit du 8 au 9 août 2007. Ces fortes pluies ont été accompagnées par une grande marée et de forts vents provenant de l'Océan. Cette situation a entraîné la pénétration des eaux de marée dans la rivière aggravant ainsi le débordement des eaux de la rivière en amont (OSCQ, 2008). Enfin, en ce qui concerne les inondations de la rivière Richelieu survenues au printemps 2011, elles résultent des conditions hydrométéorologiques en hiver et au printemps (Saad et al., 2014, 2016). De fait, en hiver, on a enregistré des chutes exceptionnelles de neige dans le bassin versant. Au printemps, la fonte de cette quantité de neige fut très rapide en raison de l'élévation rapide des températures et de la chute importante de pluies. Ces conditions furent accompagnées de vents du sud dans la vallée du lac Champlain.

En ce qui concerne les impacts des changements climatiques sur les crues et les inondations, ce sujet fait l'objet d'intenses recherches au Québec. Plusieurs thèses de doctorat dans différentes universités y sont consacrées et une subvention spéciale vient d'être octroyée en février 2018 par le Gouvernement du Québec à l'organisme Ouranos pour entreprendre des recherches poussées sur le sujet. Toutefois, Aygun et al. (2019) ont récemment publié une synthèse sur les impacts des changements climatiques sur l'hydrologie des régions des moyennes latitudes de l'hémisphère nord incluant le Québec dont les connaissances sur ces impacts sur les caractéristiques des crues et des inondations demeurent très fragmentaires. Leur synthèse porte sur tous les types des

débits. Quoi qu'il en soit, même en se fondant sur les impacts des changements climatiques prédits sur les régimes des températures et des précipitations, il est encore difficile de prédire avec un certain degré de certitude ces impacts sur l'intensité et la fréquence des crues et inondations. S'il existe une convergence de vue sur le fait que le réchauffement climatique se traduira par une diminution significative des précipitations solides (neige) et une hausse de l'évaporation en été et au printemps au Canada, une divergence persiste encore sur leurs impacts sur les fortes pluies en été et en automne (p. ex., Buttle et al., 2016). Ainsi, il persiste encore une grande incertitude sur la hausse de la fréquence et de l'intensité des crues et inondations dans le contexte de réchauffement climatique au Canada, en général, et au Québec, en particulier. On peut, tout au plus, spéculer sur le fait que la diminution de la quantité de neige en hiver et au printemps pourra diminuer significativement la fréquence et la magnitude des crues printanières générées principalement par la fonte de neige. (p. ex., Roy et al., 2001). Or, les plus grands désastres ont été provoqués fréquemment par les crues générées par les pluies torrentielles en été (déluges de Saguenay et de Montréal). Quoi qu'il en soit, certains travaux se sont déjà intéressés aux conséquences des changements climatiques sur les propriétés statistiques des séries de crues (p. ex., Ben Aissia et al., 2012; 2014).

### **1.3 Estimation des débits de crues et d'inondations au Québec méridional**

Cette problématique a fait l'objet de nombreuses publications au Québec méridional. Il faut reconnaître que plusieurs chercheurs québécois sont considérés comme des chefs de file dans ce domaine à l'échelle internationale. Historiquement, la recherche dans ce domaine s'est développée en deux principales étapes. Dans un premier temps, la recherche a été principalement concentrée sur l'amélioration de la qualité de données estimées au moyen des lois statistiques de probabilité. Cette recherche a conduit au développement des méthodes statistiques performantes qui ont permis une amélioration de l'estimation des quantiles des débits de crues. Dans un second temps, la rationalisation des réseaux de mesures de débits consécutives aux restrictions budgétaires décrétées par les deux paliers de gouvernements, fédéral et provincial, a incité les chercheurs à développer des méthodes statistiques qui permettent d'estimer les débits de crues

notamment des bassins versants non jaugés au moyen de l'information tirée des bassins versants jaugés. Ainsi, de nombreuses méthodes de régionalisation des débits de crues furent développées afin de pouvoir assurer adéquatement le transfert de cette information entre les deux types de bassins versants (Alobaidi et al., 2016; Anctil et al., 1998; Anctil et Mahevet, 2004; Chebana et al., 2014; Daviau et al., 2000; Durocher et al., 2016a, 2016b; Grehys, 1996; Haché et al., 2002; Leclerc et Ouarda, 2007; Ouarda et al., 1999a, 2001; Pandey et Nguyen, 1999; Ribeiro-Correa et al., 1995; Shu et Ouarda, 2008; Wanzeh et al., 2016).

#### **1.4 Impacts anthropiques sur les crues et les inondations au Québec méridional**

Ce sujet a déjà fait l'objet de plusieurs travaux. En ce qui concerne les barrages, plusieurs travaux ont démontré que le mode de gestion caractérisé par l'inversion du cycle naturel annuel des débits a entraîné une baisse significative de la magnitude des débits et une occurrence des débits de crues en hiver plutôt que durant les trois autres saisons comme c'est le cas en rivières naturelles. Les autres modes de gestion ont peu affecté les deux caractéristiques de crues (p. ex., Assani, 2016; 2017; Assani et al., 2006). Quant à l'agriculture et à la déforestation, plusieurs travaux ont démontré que cette activité affectait peu la magnitude des débits de crues et d'inondations (Assani, 2016a, 2016b, 2017; Assani et al., 2002, 2006, 2016; Fortier et al., 2010; Landry et al., 2013; Muma et al., 2011; Saint-Hilaire et al., 2016) même dans un contexte de changements climatiques (Quilbé et al., 2010) contrairement aux débits minimums journaliers. Toutefois, en comparant deux bassins versants contigus dont l'un est agricole (Bassin versant de la rivière L'Assomption) et l'autre entièrement forestier (Bassin versant de la rivière Matawin), on a observé que la magnitude des débits de crues (exprimée en débits spécifiques) était plus élevée dans le premier bassin versant que dans le second en raison d'un ruissellement plus important (Assani et al., 2016, 2017). Quant aux impacts de l'urbanisation, à notre connaissance, aucune étude n'a été encore réalisée au Québec spécifiquement sur l'influence de ce facteur sur les débits de crues et des inondations même si la ville de Montréal avait connu un déluge le 14 juillet 1987 à la suite des pluies diluviennes. Si on se réfère à une vaste étude menée aux États-Unis réalisée sur de

nombreux bassins versants (Poff et al., 2006), l'urbanisation peut entraîner une hausse ou une baisse de l'intensité (magnitude) et de la fréquence des débits de crues dépendamment des régions.

### **1.5 Influence des facteurs physiographiques des bassins versants sur les débits de crues et d'inondations**

Cette influence a été essentiellement analysée dans le cadre de régionalisation des débits de crues afin de procéder au regroupement des stations hydrologiques en régions hydrologiques homogènes définies notamment en fonction des similitudes de leurs caractéristiques physiographiques. Dans ce contexte, des relations ont été établies entre ces caractéristiques et les débits de crues. Les caractéristiques les plus couramment utilisées au Québec dans le cadre de ces travaux sont : la superficie du bassin versant, la surface des lacs, des marais et des forêts, l'altitude moyenne du bassin versant, la pente moyenne, la longueur totale du cours d'eau et la longitude de la station hydrométrique. Il ressort de tous ces travaux que la superficie du bassin versant est la variable physiographique la mieux corrélée aux débits de crues et d'inondations au Québec.

C'est ainsi qu'entre autres, Anctil et al. (1998) avaient proposé des relations mathématiques entre les superficies des bassins versants et les débits de crues de différentes périodes de récurrence dans les trois régions hydrologiques homogènes qu'ils ont définies au Québec méridional.

### **1.6 Influence des caractéristiques morphologiques des chenaux sur les débits de crues et d'inondations au Québec méridional**

Les études relatives aux impacts des caractéristiques morphologiques des chenaux (lits mineurs et lits majeurs) et la dynamique sédimentaire sur les crues et les inondations sont très récentes au Québec (p. ex., Buffin-Bélanger et Hétu, 2008; Buffin-Bélanger et al., 2014, 2017; Demers et al., 2014). Ces études s'intéressent particulièrement à la délimitation cartographique des zones des lits majeurs sensibles aux inondations de

différentes récurrences (espaces de liberté des rivières) d'une part, et à l'influence de la morphologie des lits mineurs et les formes géomorphologiques qui s'y développent sur la genèse des inondations, d'autre part. La finalité de ces études est de produire des cartes des zones inondables pour mieux évaluer les risques d'inondations afin de pouvoir mieux gérer ces zones humides. À ce propos, le Gouvernement du Québec vient de consacrer une enveloppe de 20 millions de dollars canadiens pour la mise à jour de la cartographie des zones inondables, surtout dans la région de Montréal, Gatineau et de la Mauricie, mais aussi les municipalités qui se sont avérées vulnérables aux inondations le printemps 2017 et dont plusieurs n'ont même pas de cartographie des zones inondables (Le Nouvelliste, 1<sup>er</sup> mars 2018).

## CHAPITRE II

### CADRE THÉORIQUE, PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

La relation entre les débits de rivières et la morphologie des chenaux s'inscrit dans le cadre de la théorie de la géométrie hydraulique (Hydraulic-Geometry Theory), développée en géomorphologie fluviale par Leopold et Maddock (1953) et en hydraulique fluviale (concept or theory regime) par Lacey (1930). La théorie de la géométrie hydraulique a déjà fait l'objet de nombreux travaux de synthèse (p. ex., Ferguson 1986; Gleason, 2015; Julien, 2014; Richards, 1977; Singh, 2003; Singh et Zhang, 2008).

#### 2.1 Énoncé et objectif de la théorie de la géométrie hydraulique (GH)

La théorie de la géométrie hydraulique décrit quantitativement la variation (temporelle) de la largeur ( $W$ ), de la profondeur ( $D$ ) et de la vitesse ( $V$ ) en fonction de celle des débits ( $Q$ ) à une station donnée (at-a-station hydraulic geometry, AHG) ou le long (variation spatiale) d'un cours d'eau (Downstream hydraulic geometry, DHG). Cette variation spatio-temporelle est exprimée mathématiquement au moyen de l'équation de la continuité de masse suivante :

$$Q = WDV \quad (1)$$

$Q$  est le débit, exprimé en  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $W$ , la largeur, exprimée en  $\text{m}$ ,  $D$ , la profondeur moyenne du chenal, exprimée en  $\text{m}$ , et  $V$ , la vitesse moyenne du courant, exprimée en  $\text{m}/\text{s}$ .

Il s'ensuit que la variation spatio-temporelle du débit dans un chenal doit être compatible avec l'ajustement combiné de la largeur, la profondeur et la vitesse. L'objectif de la théorie de la géométrie hydraulique est de décrire et prédire ces changements de la largeur, de la profondeur et de la vitesse en fonction de ceux des débits (Ferguson, 1986).



Sur la base des mesures effectuées sur le terrain sur plusieurs rivières des États-Unis d'Amérique, Leopold et Maddock ont établi trois équations reliant chacune des variables dépendantes au débit au moyen d'une fonction puissance.

$$W = aQ^b \quad (2)$$

$$D = cQ^f \quad (3)$$

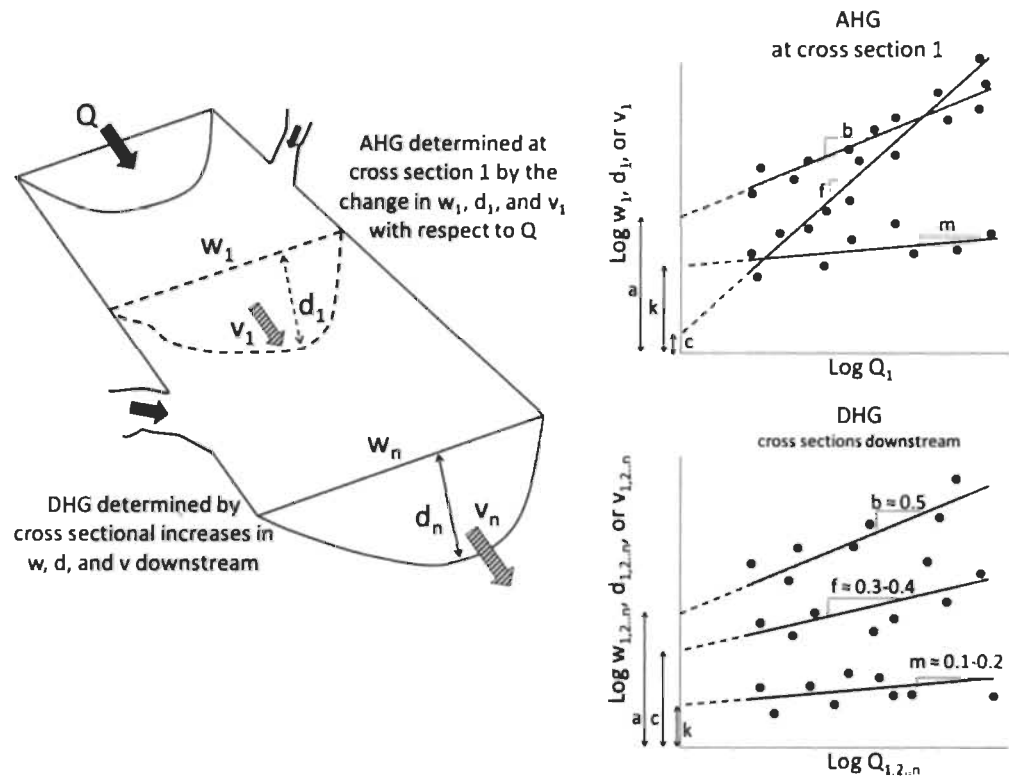
$$V = kQ^m \quad (4)$$

L'équation de continuité implique que  $b + f + m = 1$  et  $ack = 1$ . Les exposants  $b$ ,  $f$ , et  $m$  varient longitudinalement le long d'un chenal selon l'ordre  $b > f > m$ , avec des valeurs moyennes empiriques respectives de  $b = 0,5$ ;  $f = 0,4$  et  $m = 0,1$ . Ces valeurs sont comparables à celles de  $1/2$ ,  $1/3$  et  $1/6$  établies par Lacey (1930) à partir des canaux construits en Inde et en Égypte. Les exposants  $b$ ,  $f$ , et  $m$  fournissent une description quantitative et leur variation entre les stations peut donner un aperçu des conditions de contrôle pertinentes, mais une telle généralisation à partir des données empiriques ne permet pas de comprendre la relation de cause à effet et ne permet pas de prédire au-delà de la gamme de ces conditions de contrôle initiales. Contrairement aux exposants des équations, les valeurs des ordonnées à l'origine ( $a$ ,  $c$  et  $k$ ) ont suscité peu d'intérêt dans la littérature scientifique. Toutefois, en se fondant sur les relations des équations de Chézy et de Manning, Dingman (2007) avait démontré que les exposants ( $b$ ,  $f$  et  $m$ ) des équations de la géométrie hydraulique à une station dépendent de l'exposant de profondeur dans la relation hydraulique ( $p$ ) et l'exposant qui reflète la forme de la section transversale du chenal ( $r$ ). Quant aux coefficients ( $a$ ,  $c$  et  $k$ ), ils dépendent de  $p$  et de  $r$ , mais aussi de la pente de la courbe (exposant) dans la relation hydraulique généralisée et des caractéristiques physiques de la section transversale : la largeur et la profondeur maximum à plein bord ainsi que la conductivité hydraulique et la pente du fond du lit. De plus, il a aussi démontré que les fourchettes théoriques des coefficients et des valeurs des exposants et des coefficients correspondent généralement aux valeurs moyennes et individuelles observées dans les études précédentes. Toutefois, les valeurs observées des exposants des équations à des sections transversales particulières tombent généralement à l'extérieur des

fourchettes des valeurs théoriques. En particulier, les valeurs observées de l'exposant  $m$  de la vitesse sont généralement plus grandes que les valeurs théoriques suggérant ainsi que la conductivité hydraulique augmente souvent beaucoup plus fortement avec le débit que ne le prédisent les relations hydrauliques.

En ce qui concerne le débit de référence qu'il faut utiliser, il existe une différence entre la théorie de la géométrie hydraulique (Leopold et Maddock, 1953) et celle de régime (Lacey, 1930). Dans la première théorie, le débit moyen annuel est utilisé comme débit de référence alors que c'est le régime de débit stable dans la seconde théorie. Cependant, plus tard, dans la théorie de la géométrie hydraulique, le débit moyen annuel a été remplacé par le débit à plein bord.

Enfin, la nature de la relation « puissance » (loi de puissance) observée entre le débit et les trois variables a été questionnée par plusieurs auteurs (p. ex., Knighton, 1974, 1975; Richards, 1973; Philipps et Harlin, 1984; Ferguson, 1986). En utilisant de simples lois de l'écoulement basées sur les équations de Manning, de Chézy et Darcy-Weisbach, Ferguson (1986) a démontré que les exposants des équations de la géométrie hydraulique à une seule station dépendaient complètement de la géométrie de la section transversale du chenal et, par conséquent, ces équations ne peuvent prendre que la forme de la relation puissance imposée par cette géométrie. Il importe de mentionner que les équations de la géométrie hydraulique communément utilisées sont valides pour les débits inférieurs ou égaux au débit à plein bord. Toutefois, Garbrecht (1990) a démontré qu'elles pouvaient être appliquées pour des débits supérieurs au débit à plein bord, c'est-à-dire aux débits d'inondations.



**Figure 2.1** Les relations hypothétiques entre AHG et DHG sont données pour cet exemple de chenal avec deux tributaires.

AHG est fonction de la géométrie de la section transversale faisant en sorte que les valeurs de  $b$ ,  $f$  et  $m$  pour la section transversale 1 sont déterminés par la forme du chenal en ce point (Gleason 2015).

### 2.1.1 La théorie de géométrie hydraulique à une seule station (AGH)

À la suite des travaux de Leopold et Maddock (1953), de nombreux travaux ont été consacrés à la vérification empirique des relations établies par ces auteurs dans des différents sites et milieux physiographiques (Gleason, 2015). Les résultats de ces recherches ont été compilés séparément par Park (1977) et Rhodes (1977, 1978, 1987), qui ont introduit indépendamment le diagramme triangulaire  $b$ - $f$ - $m$  pour montrer la dispersion des valeurs calculées à partir des données mesurées sur le terrain. En représentant les valeurs de ces trois exposants dans le diagramme triangulaire, les sections transversales des chenaux peuvent être placées dans un contexte l'un de l'autre pour expliquer comment ces exposants sont reliés à travers les différentes rivières des milieux différents. Park et Rhodes ont observé une corrélation entre les rivières en

fonction des valeurs de leurs exposants. Park a regroupé les données sur la base des ruptures naturelles entre les exposants et Rhodes l'avait fait sur la base de la classification de rivières. Malgré cette différence dans la classification et le regroupement des valeurs des exposants, les deux auteurs ont conclu que les exposants des équations de la géométrie hydraulique à une station montraient une faible similitude à travers les rivières ou les milieux physiographiques. Selon Park, ces résultats jettent un doute sur l'utilisation des valeurs moyennes des valeurs des exposants des échantillons pour caractériser la géométrie hydraulique d'une région particulière. Cette conclusion diffère significativement de celle de Leopold et Maddock (1953) qui ont regroupé leurs données d'observation limitées et ont trouvé que les rivières ayant des classifications similaires avaient des exposants des valeurs similaires. Ils ont conclu logiquement qu'une valeur moyenne de ces exposants était suffisante pour décrire un système de rivières ou une région. Par ailleurs, Knighton (1975) avait observé que les valeurs des exposants évoluent avec le temps qui se traduit par le changement de la pente des équations à l'intérieur des données mesurées à long terme. Ce changement dans le temps des valeurs des exposants suggèrent que la théorie AHG telle qu'elle a été formulée par Leopold et Maddock ne raconte pas toute l'histoire de la géométrie du chenal et de celle de l'hydraulique de l'écoulement. Par ailleurs, quant à Harlin (1984) et Park (1977), ils ont démontré que les valeurs de ces exposants ne sont pas non plus constantes dans l'espace.

### **2.1.2 La théorie de la géométrie hydraulique longitudinale (DGH)**

La largeur et la profondeur des chenaux sont corrélées de manière régulière au débit à plein bord à toutes les échelles allant des petits chenaux de laboratoire aux grands fleuves. Cette corrélation suggère que les changements transitoires des dimensions des chenaux à un point sont mineurs comparativement à ceux qui affectent la variation systématique longitudinale de ces dimensions. Même si le débit est le facteur dominant de ces dimensions, la dispersion de ses effets suggère intuitivement l'existence d'autres facteurs pertinents (Ferguson, 1986). Ainsi, de nombreux chercheurs ont contesté la formulation originale de la théorie de DGH en utilisation des données empiriques. Carlston (1969) a conclu que la vitesse du courant peut parfois augmenter ou parfois rester

constante longitudinalement. Ainsi, durant la décennie 1980, la définition même de la théorie DGH a commencé à changer. Les chercheurs se sont demandé pourquoi la théorie de DGH est-elle reliée au débit moyen annuel comme variable indépendante alors que les propriétés hydrauliques utiles d'une rivière dans le cadre de la théorie changent avec la hausse des débits jusqu'à ce que ceux-ci restent dans le chenal et atteignent le débit à plein bord. De plus, les débits à plein bord ont été reconnus avoir une forte influence sur la morphologie du chenal que les débits moyens annuels et exercent les forces de cisaillement moyennes les plus fortes sur les berges. Ainsi, au début de la décennie 1980, le débit à plein bord a remplacé le débit moyen annuel dans les ouvrages d'hydrologie et vers le milieu de la décennie 2000, ce changement dans l'application de la théorie a été accepté malgré l'utilisation encore des débits moyens annuels dans la pratique. L'utilisation des variables à plein bord permet à la théorie DGH d'être investiguée même lorsque les données des débits à plein bord ne sont pas mesurées sur le terrain.

La recherche empirique a permis d'intégrer d'autres facteurs dans la relation des débits et les trois variables (largeur, profondeur et vitesse), en particulier les facteurs qui caractérisent la résistance des berges à l'érosion et la végétation. Outre ces facteurs, Lee et Julien (2006) ont testé empiriquement une forme théorique de DGH en introduisant, outre le débit, le diamètre moyen des sédiments, la pente ou le nombre de Shields comme variables indépendantes. La végétation et la résistance des berges sont d'autres paramètres clés ajoutés aux équations de la DGH (Huang et Nanson, 1997, 1998; Hang et Warner, 1995). Selon ces auteurs, l'ajout de ces paramètres clés décrit de manière beaucoup plus précise la géométrie des rivières que celle proposée par Leopold et Maddock (1953). Selon Hang et Warner (1995), le coefficient de résistance des berges dépend de type de végétation et de sédiment des berges et confirmèrent que la végétation des berges affecte les coefficients et pas les exposants des équations de la DGH. De plus, la végétation affecte plus la largeur du chenal que sa profondeur ou la vitesse du courant (Huang et Nanson, 1997; Allmendiger et al., 2005). Cependant, selon Merritt et Wohl (2003), il est difficile de démêler les effets d'une crue qui a drastiquement changé la géométrie dans un environnement aride. Ils conclurent que tandis que la crue a changé la DGH, le chenal existant a influencé aussi l'acheminement des eaux de la crue dans le

système. De même, Huang et Nanson (1997) ont observé que la résistance de berges exercerait une forte influence sur la géométrie du chenal, et celle-ci exercerait aussi une forte influence sur la résistance des berges à travers des interactions entre la végétation de berges et l'écoulement. Quant à Anderson et al. (2004), ils ont observé que l'influence de la végétation sur la DGH dépend de la taille du système. Enfin, les recherches empiriques ont confirmé que la puissance prédictive additionnelle de la DGH peut être obtenue en incluant des termes (variables additionnelles) parmi le débit, la largeur, la profondeur et la vitesse.

### 2.1.3 La théorie de la géométrie hydraulique à de nombreuses stations (AMHG)

De nombreuses recherches ont été menées sur la géométrie hydraulique à une seule station (AHG) et la géométrie hydraulique longitudinale (DHG). Comme l'avait fait remarquer Rhodes (1977): « *all cross sections of a given stream system are interrelated. Thus, it seems reasonable to expect some relationship to exist between the (AHG) of channels in a downstream direction* ». Selon Gleason (2015), cette idée diffère de la théorie de la géométrie hydraulique longitudinale (DHG). De même, Orlandini et Rosso (1998) lient explicitement AHG et DHG en se fondant sur l'idée que le même épisode de ruissellement influence l'écoulement aussi bien à une station que tout le long du chenal en reliant toutes les stations à la sortie de l'ensemble du réseau hydrographique. Ils proposèrent ainsi une équation dans laquelle deux constantes relient les variables qui changent avec la localisation de sites et dépendent de l'exposant  $b$  d'AHG et de la sortie de débits. Récemment, Gleason et Smith (2014) ont observé que les coefficients et les exposants jumelés des équations d'AHG le long d'une rivière présentent un lien semi-log très fort sur de longues distances qui peuvent être supérieures à 3000 km. Ils ont donc appelé cette relation la géométrie hydraulique à de nombreuses stations (at-many-stations hydraulic geometry) et ont démontré son existence dans les données mesurées sur le terrain et par stations de jaugeage gérées par USGS (United State Geological Survey) et d'autres agences. Cette relation montre que les coefficients et les exposants des équations d'AHG sont fonctionnellement liés et prévisibles de manière fiable d'une station à l'autre, et qu'un paramètre des équations d'AHG peut être calculé à partir d'un autre connu dans

les équations d'AMHG. Du point de vue géomorphologique, les équations d'AMHG suggèrent l'existence des séries de valeurs de largeur-débit, vitesse-débit et profondeur-débit qui sont partagées par toutes les sections transversales dans une même rivière.

## 2.2 Apports de la théorie de la géométrie hydraulique

L'apport le plus significatif de la théorie de la géométrie hydraulique à une station (AHG) est sans nul doute son utilisation pour mesurer les débits instantanés au moyen de la courbe de tarage, « rating curve » (courbe qui relie les débits en fonction de niveaux d'eau dont la variation dépend de la largeur, la profondeur et la vitesse du courant). Selon Gleason 2015, *“it is fair to say that without the AHG, rating curve, continuous time series of streamflow data would not be available to the public.”* Gleason et Wang (2015) ajoutent qu'AHG reste un outil vital pour les hydrologues et les gestionnaires des ressources hydriques comme le principal moyen d'estimation des débits de rivières à travers le monde. De fait, selon Ferguson (1986), les applications de la théorie de géométrie hydraulique sont nombreuses et variées. Elle est importante pour une gamme entière des activités de gestion des rivières incluant le suivi des débits (courbes de tarage), la modélisation pour la détection des points de pollution et l'estimation des débits minimums requis (débits réservés) pour le passage des poissons et des bateaux récréatifs ainsi que l'évaluation des habitats de poisson. Selon Dingman (2007), AHG est aussi un outil utile dans de nombreux types d'analyses hydrologiques. Il peut être utilisé directement dans le transfert (acheminement) des eaux de crues et peut être combiné aux courbes de durée- fréquence des débits pour produire des courbes des durées des indices des ressources hydriques pour les analyses des habitats lotiques, la gestion de la qualité des eaux, des études sur la sédimentation dans les réservoirs et la détermination de la fréquence de mouvement de sédiments. Elle peut aussi être utilisée pour estimer les débits au moyen de la télédétection.

Quant à la théorie de la géométrie hydraulique longitudinale (DHG), elle est importante pour la calibration des canaux et des chenaux. Elle offre aussi les perspectives de prédiction des réactions des rivières à la régularisation ou au transfert de



leurs eaux. Elle est aussi utilisée pour estimer les débits présents et passés à partir de la morphologie des chenaux (Ferguson, 1986). Ainsi, Tinkler et Pengelly (1995) l'ont utilisée pour estimer les débits générés dans les paléoplaines alluviales par des ruptures de glace de lacs dans le passé lointain. Toutefois, Niewow et al. (1996) ont découvert que la théorie n'était pas applicable dans les chenaux de rivières subglaciaires en raison du phénomène d'hystérésis. Elle a été appliquée pour modéliser la propagation des ondes de crues dans le fleuve Colorado (Paik et Kumar, 2004). Enfin, la théorie a été appliquée dans divers environnements géographiques allant des régions glaciaires (p. ex., Best et al., 2005) aux régions de hautes montagnes (Comiti et al., 2007, Ferguson, 2007).

### **2.3 Étude de la largeur des chenaux dans le cadre de la théorie de la géométrie hydraulique**

Parmi les trois variables qui composent les équations de la théorie de géométrie hydraulique, la largeur des chenaux est la plus étudiée. Ceci s'explique par le fait que la largeur est une variable plus facile à mesurer que la profondeur ou la vitesse du courant. De fait, on peut mesurer la largeur d'un cours d'eau à partir des photographies aériennes sans devoir se rendre sur le terrain. De nombreux travaux ont été consacrés à l'analyse de la largeur des cours d'eau dans le cadre de la théorie de la géométrie hydraulique. L'aspect de la théorie la plus investiguée est la théorie de la géométrie hydraulique longitudinale (DHG). Comme on l'a déjà mentionné dans l'exposé de cette théorie, des travaux postérieurs au travail pionnier de Leopold et Maddock (1953), ont clairement démontré la variabilité longitudinale de la largeur des cours d'eau ne dépend pas seulement de débit, mais aussi de nombreux autres facteurs. C'est dans ce contexte que ces travaux se sont intéressés à identifier les facteurs qui influencent cette variabilité longitudinale. Ces travaux ont été abondamment effectués aux États-Unis (p. ex., Anderson et al., 2004; Arrington et James, 2013; Bieger et al., 2015; Castro et Jackson, 2001; Doll et al., 2002; Faustini et al., 2009; Golden et Springer, 2006; Jewell et Kimball, 2013; Jackson et al., 2014; Lawlor, 2004; Leigh, 2010; Taniguchi et Biggs, 2015; Savenije, 2003; Sweeney et al., 2004). Ces travaux ont ainsi identifié l'influence des nombreux facteurs sur la



variabilité longitudinale de la largeur, en particulier la largeur à plein bord, des rivières. Cette influence est résumée au tableau 2.1.

**Tableau 2.1**

Synthèse des principaux facteurs et tendances probables de leurs impacts sur la largeur des chenaux (Anderson et al., 2004)

Facteurs	Description des processus	Tendance probable des impacts sur la largeur
Sédiments de berges (limons et argiles)	Forte proportion en limon et argile sans végétation de berges	Diminution de la largeur
Végétation	Épais corridor boisé sur les berges le long des chenaux de larges rivières (largeur du chenal > 10 à 15 m ou superficie des bassins versants > 10 à 100 km <sup>2</sup> )	Diminution de la largeur
	Épais corridor boisé sur les berges le long des petits cours d'eau (largeur du chenal < 10 à 15 m ou superficie des bassins versants < 10 à 100 km <sup>2</sup> )	Augmentation de la largeur
	Mince corridor boisé sur les berges le long des chenaux de larges rivières (largeur du chenal > 10 à 15 m ou superficie des bassins versants > 10 à 100 km <sup>2</sup> )	Augmentation de la largeur
	Végétation herbacée avec des profondes racines le long des chenaux des petits cours d'eau (largeur du chenal < 10 à 15 m ou superficie des bassins versants < 10 à 100 km <sup>2</sup> )	Diminution de la largeur
La densité des bois morts dans les rivières (LWD)	Masse élevée et/ou longueur de LWD égale ou supérieure à la largeur du chenal	Augmentation de la largeur?
	Masse faible ou modérée de LWD et/ou leur orientation parallèle au courant ou stabilise/protège les berges	Diminution de la largeur
	Les embâcles de bois dans les tronçons de rivières à faible énergie tendent à élargir les chenaux en amont alors que dans les tronçons à forte énergie, les chenaux ont de largeur variable à leur présence.	Augmentation de la largeur
Utilisation des sols	L'enlèvement de LWD peut mener à l'élargissement des chenaux dans le NW Pacifique des États-Unis. Possible rétrécissement des chenaux si LWD n'est pas une source d'érosion des berges.	Augmentation et diminution de la largeur?
	Urbanisation	Augmentation de la largeur

Facteurs	Description des processus	Tendance probable des impacts sur la largeur
	Le reboisement peut stabiliser ou déstabiliser les berges dépendamment de la taille du chenal, de la vulnérabilité des berges à l'érosion exposées aux processus de gel et dégel.	Les impacts réels ne sont pas connus
Recouvrement de la canopée	Recouvrement considérable réduisant la disponibilité de la lumière, diminution potentiellement l'établissement ou la croissance de la stabilisation de la végétation des berges	Augmentation de la largeur
Gel et dégel	Les cycles de gel et dégel le plus fréquents sont associés à un taux d'érosion élevé.	
Densité racinaire	Une forte densité racinaire est associée à un taux d'érosion faible. Diminution de la densité racinaire, associée à une hausse de la teneur en argile et limon, réduit le taux d'érosion de berges. L'effet de la densité racinaire sur l'érosion est moindre lorsque la hauteur des berges dépasse la profondeur atteinte par les racines.	Diminution de la largeur
Profondeur du système racinaire	Profondeur relative par rapport à la hauteur des berges. Système racinaire très profond peut réduire l'érosion des berges	Diminution de la largeur
Les précipitations	La hausse des précipitations augmente l'élargissement des chenaux par le biais des débits.	Augmentation de la largeur

Ce tableau montre clairement que la variabilité longitudinale de la largeur des chenaux est influencée par de nombreux facteurs. Par ailleurs, en ce qui concerne les équations de la théorie hydraulique, de nombreux travaux ont utilisé la superficie des bassins versants, comme variable explicative, à la place des débits moyens annuels ou des débits à plein bord. Ce choix se justifie par la facilité de mesurer les superficies des bassins versants. Le tableau 2.2 donne un exemple de ces équations dans le Nord-Ouest Pacifique des États-Unis. La comparaison des coefficients et des exposants des équations montre qu'ils varient selon les régions. Il importe de noter que les valeurs des exposants calculées à partir des superficies des bassins versants sont supérieures à celles calculées à partir des débits à plein bord dans les cinq régions physiographiques. C'est le contraire pour les valeurs des coefficients (ordonnées à l'origine).

**Tableau 2.2**

Exemples d'équations reliant la largeur à plein bord des chenaux aux superficies des bassins versants et aux débits à plein bord dans le Nord-Ouest des États-Unis (Castro et Jackson, 2001)

Régions physiographiques	Superficies des bassins versants (DA)	Débits à plein bords (Q)
Nord-Ouest Pacifique	$W = 11.8DA^{0.38}$	$W = 2.34Q^{0.49}$
Maritime montagneux Pacifique	$W = 12.39DA^{0.43}$	$W = 2.37Q^{0.50}$
Bassin occidental intérieur	$W = 3.27DA^{0.51}$	$W = 0.96Q^{0.60}$
Cordillères occidentales	$W = 9.40DA^{0.42}$	$W = 3.5Q^{0.44}$

W = largeur à plein bord.

## 2.4 Étude de la sinuosité dans le cadre de la théorie hydraulique

Contrairement à la largeur à plein bord, la sinuosité des chenaux a été très peu analysée dans le cadre de la théorie de la Géométrie Hydraulique. Celle-ci s'est particulièrement intéressée aux caractéristiques des méandres qui définissent la sinuosité. Dans leur travail pionnier, Leopold et Maddock (1953) ont ainsi établi une relation mathématique entre les débits et la longueur d'onde des méandres.

Schumm (1969) fut le premier à établir une équation mathématique empirique reliant les débits (liquide et solide) et la sinuosité des chenaux au moyen des données empiriques. Dans son étude, il a démontré que, contrairement à la largeur à plein bord, la sinuosité dépend exclusivement du type de la charge sédimentaire selon la relation empirique suivante :

$$S = 0,94Q_s^{0,25} \quad (5)$$

S et  $Q_s$  étant respectivement la sinuosité des chenaux et le type de charge sédimentaire transportée par une rivière. La charge sédimentaire a été calculée comme un indice du rapport entre la charge sédimentaire de fond (charriage) et la charge sédimentaire totale (charge de fond et charge en suspension) ou tout simplement le pourcentage des éléments fins (limons et argiles) des berges des chenaux.

Outre cette relation quantitative, en s'inspirant de la relation qualitative proposée par Lane, Schumm (1969) a aussi établi une relation qualitative entre la sinuosité ainsi que les quatre variables suivantes : les débits, la charge sédimentaire de fond, la taille des sédiments et la pente longitudinale des chenaux. Ces relations sont résumées au tableau 2.3. Dans ce tableau, on a aussi ajouté l'évolution des trois variables morphologiques, à savoir, la largeur et la profondeur des chenaux ainsi que la longueur d'onde des méandres. Ce tableau révèle qu'une hausse des débits liquides et solides d'un cours d'eau entraîne une diminution de la sinuosité du chenal en raison des recoupements des méandres. Et inversement, une baisse de ces débits s'accompagne d'une hausse de la sinuosité du chenal. Si le débit liquide augmente et le débit solide diminue, la sinuosité du chenal augmente. À l'inverse, si le débit liquide diminue et le débit solide augmente, la sinuosité diminue. Schumm (1969) avait appliqué ces relations qualitatives pour expliquer les impacts des changements climatiques et des barrages sur l'évolution temporelle ou la métamorphose des trajectoires des rivières en Australie et aux États-Unis d'Amérique.

Les conclusions de Schumm (1969) ont été validées par Lazarus et Constantine (2013) à partir d'autres données empiriques et des simulations numériques. Selon ces derniers auteurs, la sinuosité des chenaux est fondamentalement influencée par la résistance de l'écoulement (représentant la rugosité du paysage attribuable à la topographie et à la densité de la végétation des berges) relative à la pente de surface. Ils concluent aussi que cette sinuosité est ainsi indépendante de la dynamique interne de l'écoulement, c'est-à-dire, les débits liquides.

**Tableau 2.3**

Relation qualitative entre les débits (liquide et solide) et les variables morphologiques (Schumm, 1969)

Variables indépendantes		Variables dépendantes				
Débit liquide	Débit solide	Sinuosité du chenal	Largeur du chenal	Profondeur du chenal	Longueur d'onde	Pente du chenal
+	0	0	+	+	+	-
-	0	0	-	-	-	+
0	+	-	+	-	+	+
0	-	+	-	+	-	-
+	+	-	+	±	+	±
-	-	+	-	±	-	±
+	-	+	±	+	±	-
-	+	-	±	-	±	+

+ = hausse; - = baisse; 0 = aucun changement; ± = hausse ou baisse; \*le débit (charge) solide est exprimé différemment de celui de l'équation quantitative 5. Sa valeur est inverse de celle de l'équation 5.

## 2.5 Problématiques, objectifs et originalité de l'étude

Des points de vue hydrologiques et hydrogéomorphologiques, les inondations sont généralement définies comme des débits de crues ayant provoqué le débordement des eaux dans les lits majeurs ou les plaines alluviales. Par conséquent, il existe un seuil maximum de débit avant l'occurrence de ce débordement. Ce débit est connu sous le nom du débit à plein bord. Selon Petit et Daxhelet (1989), la détermination de ce débit à plein bord est extrêmement importante dans la gestion des inondations et des cours d'eau en général pour les trois raisons suivantes :

- 1) Le débit à plein bord se présente comme le meilleur moyen d'évaluer les risques de débordement et donc d'inondation dans la plaine alluviale, avec ce que ceci implique notamment au point de vue de l'aménagement du territoire.
- 2) Sur le plan géomorphologique, le débit à plein bord apparaît également comme un débit caractéristique, car il représente le débit au-delà duquel des phénomènes de sédimentation pourront se produire dans le lit majeur :

édification éventuelle de levées naturelles, décantation de matériel fin dans la plaine alluviale. De même, certains phénomènes d'érosion dans le lit majeur, qui peuvent provoquer des changements de tracé de la rivière en conditions naturelles, ne peuvent être générés que par des débits supérieurs au débit à plein bord. Il s'agit notamment des phénomènes de recoupement de méandre et d'arrachage du tapis végétal pouvant aboutir à l'initialisation de chenaux de recoupement. Le débit à plein bord a souvent été considéré comme le point optimum d'efficacité pour les modifications géomorphologiques dans le lit mineur et notamment pour le façonnement des méandres. Ceci explique d'ailleurs que plusieurs relations aient été établies entre le débit à plein bord et les paramètres géométriques des chenaux (largeur, profondeur) ainsi que la longueur d'onde des méandres.

- 3) Sur le plan hydrologique, il est intéressant de déterminer le débit à plein bord en raison de son influence sur la propagation de l'onde de crue dans un chenal. De fait, l'onde de crue associée au débit à plein bord a une plus grande chance de se propager rapidement vers l'aval qu'en période de crue avec inondation du fait de l'immobilisation d'une masse d'eau relativement importante dans la plaine alluviale.

Cependant malgré l'importance du débit à plein bord et l'intérêt croissant accordé à la problématique des inondations au Québec, il n'existe encore aucune étude sur la détermination de ce débit. Sa détermination devient ainsi cruciale pour une meilleure compréhension de la dynamique des inondations et leur évolution dans le contexte de réchauffement climatique au Québec.

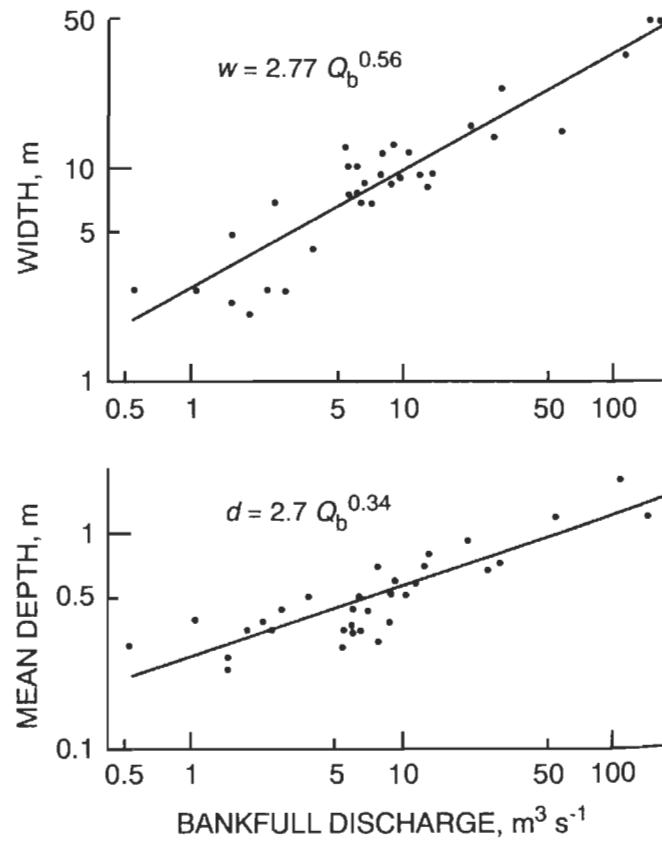
La détermination des débits à plein bord requiert des observations et mesures minutieuses et soutenues de terrain. Ces observations sont financièrement onéreuses au regard d'un grand nombre de cours d'eau qui drainent le territoire de la Province du Québec. Ainsi, malgré la nécessité de la détermination de ce débit à plein bord, il est préférable d'acquérir au préalable des connaissances sur les variables morphologiques qui peuvent contribuer à la détermination indirecte des valeurs de ces

débites à plein bord d'une part, et des facteurs qui les influencent d'autre part. Comme on l'a déjà mentionné, du point de vue hydrologique, le débit à plein bord est le principal facteur qui influence significativement la largeur, la profondeur et la sinuosité des chenaux (Figure 2.2.). De ces trois variables, la largeur et la sinuosité sont des variables candidates pour déterminer indirectement les débits à plein bord du fait que l'acquisition de données de ces deux variables peut être obtenue à coût financier peu onéreux par l'analyse des cartes topographiques. Il existe très peu de données sur les profondeurs moyennes à plein bord des chenaux au Québec. L'acquisition de ces données nécessite de nombreuses mesures de terrain.

À la lumière de ces considérations, notre travail poursuit les trois objectifs suivants :

- 1) Déterminer les facteurs hydrologiques (débits) et physiographiques des bassins versants qui influencent la variabilité spatiale des largeurs à plein bord et de la sinuosité des chenaux au Québec méridional.
- 2) Établir des relations mathématiques entre la largeur et la sinuosité et le facteur qui leur sera mieux corrélé pour pouvoir estimer les deux premières variables morphométriques pour les rivières qui ne seront pas analysées dans le cadre de cette étude. Ces relations seront comparées à celles établies dans d'autres régions du monde.
- 3) Comparer les valeurs des coefficients et des exposants de ces relations mathématiques dans le cadre de la théorie de la géométrie hydraulique.

En ce qui concerne l'originalité de cette étude, contrairement à tous les travaux antérieurs déjà consacrés à la théorie de la géométrie hydraulique, la présente étude s'intéresse à vérifier cette théorie en l'appliquant sur la variabilité longitudinale de la moyenne de la largeur à plein bord. De plus, sur le plan méthodologique, cette étude applique pour la première fois la méthode de l'analyse canonique des corrélations pour sélectionner les variables les mieux corrélées aux moyennes de la largeur à plein bord.



**Figure 2.2** Relation empirique entre les débits à plein bord et la largeur ainsi que la profondeur moyenne des chenaux (Knighton, 1998).



## CHAPITRE III

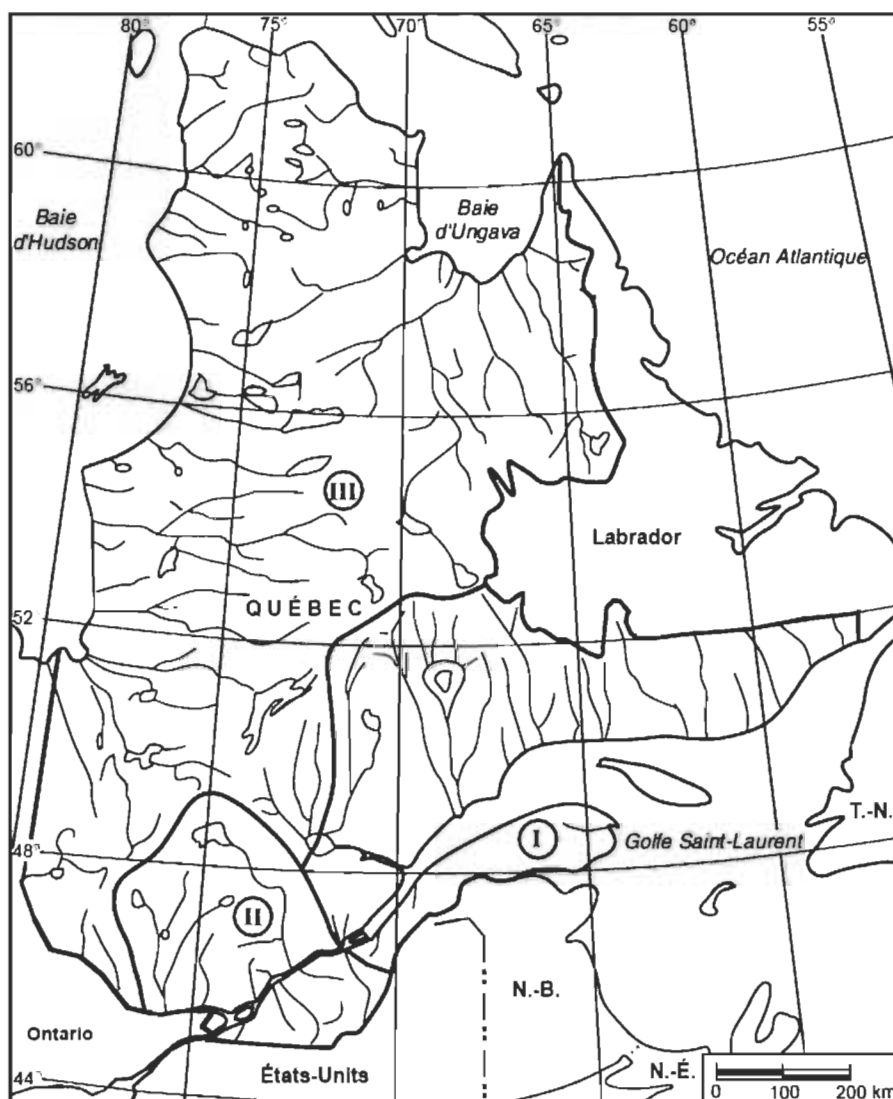
### MÉTHODOLOGIE

#### 3.1 Description de la région d'étude et justification du choix des stations analysées

Sur le plan hydrographique, la province du Québec est subdivisée en trois grands bassins versants hydrographiques : le bassin du fleuve Saint-Laurent (673 000 km<sup>2</sup>) ainsi que ceux des baies d'Ungava (518 000 km<sup>2</sup>) et d'Hudson (492 000 km<sup>2</sup>). Toutes les rivières analysées dans le cadre de cette étude sont situées exclusivement dans le bassin du Saint-Laurent, situé entre les parallèles 45°N et 50°N et les méridiens 76° et 65° ouest. Celui-ci est constitué de trois régions physiographiques : le Bouclier canadien en rive nord, les Appalaches en rive sud et les Basses-terres du Saint-Laurent sur les deux rives de part et d'autre du fleuve. D'âge précambrien, le Bouclier canadien est constitué de roches métamorphiques et sédimentaires altérées (calcaires cristallins, gneiss, et quartzite) et de roches magmatiques (granite, anorthosite, gabbro). Sur le plan hydrographique, les cours d'eau qui entaillent ce Bouclier sont caractérisés par une alternance quasi régulière des tronçons sableux et des tronçons caillouteux ou rocheux. Quant aux Appalaches, ancienne chaîne de montagnes plissée d'âge paléozoïque, elles sont constituées principalement des schistes calcaires et de grès. La charge de fond des rivières de cette région est essentiellement constituée des sédiments grossiers (graviers et cailloux). La dernière région, les Basses-terres du Saint-Laurent, est caractérisée par une topographie quasi plate constituée de schistes, de calcaires et de grès d'âge ordovicien. Ces roches sont couvertes par un épais manteau d'argile et de sable d'origine marine. Contrairement aux deux régions précédentes, la charge de fond des rivières est constituée principalement de sable fin, la charge en suspension devenant plus importante en raison de la présence d'une quantité importante d'argile.

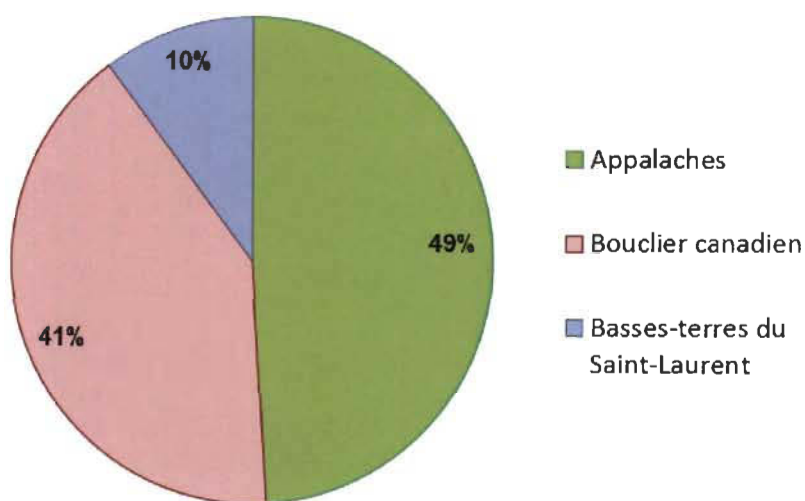
Le choix des rivières à analyser a été fondé sur les critères suivants : l'existence des mesures continues des débits journaliers naturels ou très peu influencés sur une période

minimale de 20 ans, l'existence des données sur les variables indépendantes et, enfin, l'existence des orthophotographies numérisées pour pouvoir mesurer les données de la largeur à plein bord. Sur la base de ces trois critères, 49 rivières ont été analysées : 24 pour le Bouclier canadien, 20 pour les Appalaches et 5 pour les Basses-terres du Saint-Laurent (Tableau 3.1 et Figure 3.2). De plus, il faut mentionner que ces stations sont réparties de manière quasi régulière dans les trois régions hydrologiques homogènes définies par Anctil et al. (1998) en régionalisant les débits de crues au Québec (Figure 3.1).

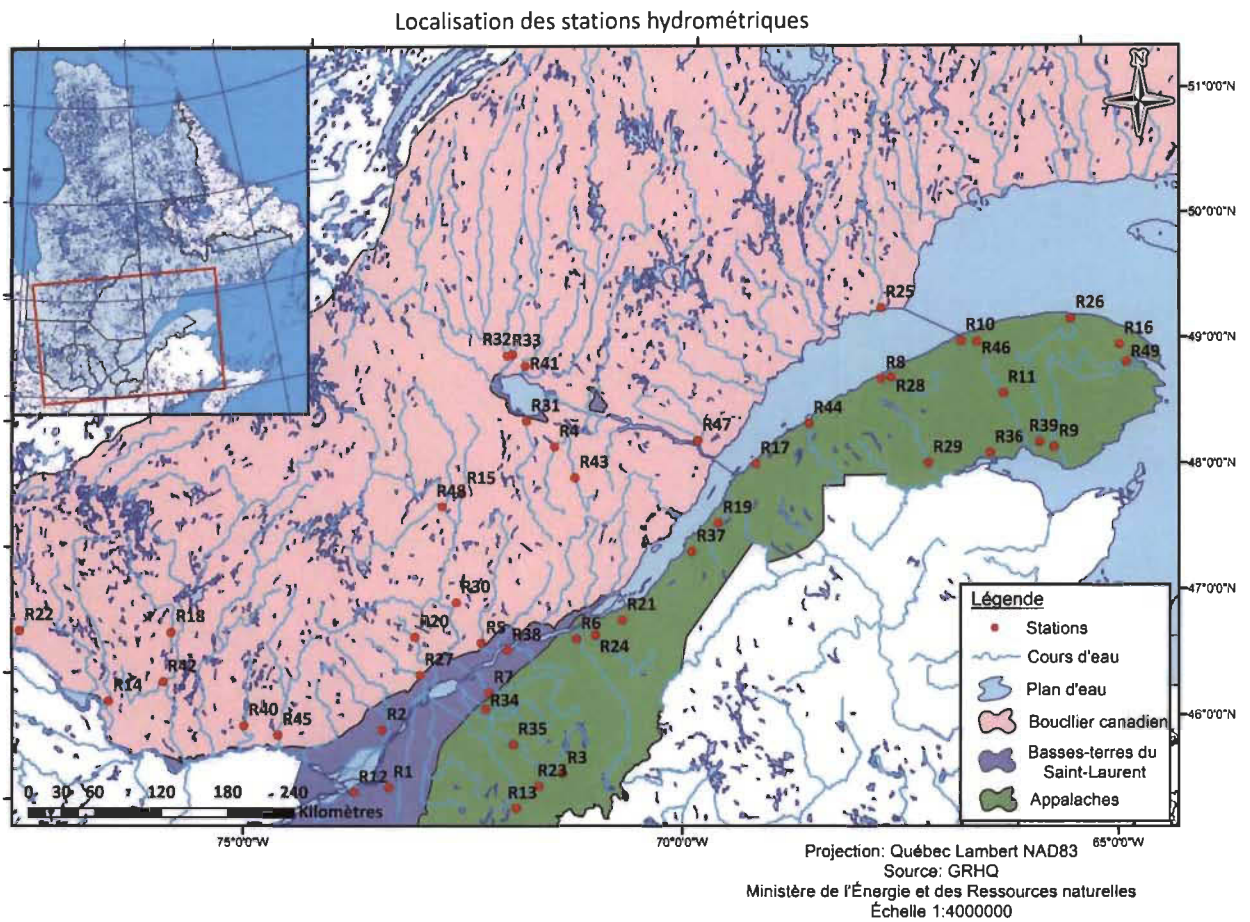


**Figure 3.1** Régions hydrologiques homogènes définies par Anctil (1998).

Il faut rappeler que l'objectif de notre étude est d'analyser les facteurs de la variabilité spatiale des largeurs moyennes à plein bord. Il est par conséquent important de tenir compte des rivières situées dans les trois régions hydrologiques homogènes. Outre les débits de crues, les caractéristiques lithologiques influencent aussi significativement la largeur à plein bord. Les stations retenues sont ainsi réparties sur les trois grandes formations géologiques définies précédemment. Comme le révèlent les figures 3.2 et 3.3, plus de 85 % de rivières retenues sont réparties équitablement sur le Bouclier canadien et les Appalaches, les deux formations géologiques les plus étendues dans le bassin versant du fleuve Saint-Laurent.



**Figure 3.2** Distribution des bassins versants à l'étude dans les trois régions physiographiques.



**Figure 3.3** Répartition des stations hydrométriques dans les régions physiographiques.

**Tableau 3.1**  
Caractéristiques des rivières analysées

Nom	ID	Superficie (km <sup>2</sup> )	Longueur (km)	Pente	Forêt (%)	Plans d'eau (%)	Latitude (Nord)	Longitude (Ouest)	Précipitations (mm)	Q <sub>2</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Largeur moyenne (m)	Sinuosité
<i>Appalaches</i>												
Au Saumon	30282	738	53,4	4,07	89,3 %	0,3 %	45° 34' 48"	-71° 23' 6"	1200	215	54,03	1,358
Beaurivage	23401	707	56,8	4,85	44,0 %	4,0 %	46° 39' 25"	-71° 17' 20"	1100	189	37,89	1,584
Blanche	21702	208	33,6	4,94	83,0 %	3,0 %	48° 46' 1"	-67° 39' 58"	1000	49	15,33	1,833
Bonaventure	10802	1930	109,1	4,62	99,8 %	0,2 %	48° 11' 14"	-65° 33' 33"	1100	384	63,62	1,352
Cap-Chat	21502	722	56,6	5,14	97,8 %	0,3 %	49° 3' 20"	-66° 40' 9"	1000	220	60,48	1,271
Cascapédia	11003	1681	66,8	9,55	99,4 %	0,5 %	48° 37' 45"	-66° 9' 58"	1050	380	89,64	1,299
Coaticook	30215	521	62,8	4,43	57,0 %	4,0 %	45° 17' 4"	-71° 54' 3"	1100	109	27,79	1,642
Dartmouth	20602	630	61,1	6,44	99,8 %	0,2 %	48° 58' 40"	-64° 41' 59"	950	191	59,84	1,580
Des Trois-Pistoles	22301	966	58,7	23,6	74,0 %	1,0 %	48° 5' 21"	-69° 11' 43"	1000	220	46,39	1,627
Du Loup <sup>507</sup>	22507	516	51,9	4,13	92,9 %	0,4 %	47° 36' 43"	-69° 38' 41"	1000	88	30,55	1,454
Du Sud	23106	824	53,5	6,38	74,0 %	1,0 %	46° 49' 12"	-70° 45' 22"	1050	263	70,51	1,330
Eaton	30234	642	48,9	5,6	84,0 %	4,0 %	45° 28' 5"	-71° 39' 18"	1100	173	47,00	1,290
Etchemin	23303	1160	105,9	3,7	62,1 %	0,7 %	46° 41' 29"	-71° 4' 5"	1100	298	84,14	1,499
Madeleine	20802	1217	97,4	3,42	99,0 %	1,0 %	49° 12' 10"	-65° 17' 41"	1000	283	56,58	1,259
Matane	21601	1647	72,2	4,62	94,0 %	1,0 %	48° 46' 25"	-67° 32' 25"	1000	398	64,43	1,274
Matapédia	11509	2734	41,9	3,6	15,1 %	1,9 %	48° 6' 28"	-67° 7' 49"	1000	407	80,86	1,293
Nicolet	30103	1540	93,3	1,9	40,0 %	1,0%	46° 3' 37"	-72° 18' 47"	1000	416	95,82	1,388
Nicolet-Sud	30101	544	45,3	4,43	49,0 %	1,0 %	45° 47' 30"	-71° 58' 5"	1050	134	35,08	1,422

Nom	ID	Superficie (km <sup>2</sup> )	Longueur (km)	Pente	Forêt (%)	Plans d'eau (%)	Latitude (Nord)	Longitude (Ouest)	Précipitations (mm)	Q <sub>2</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Largeur moyenne (m)	Sinuosité
Nouvelle	11201	1138	68,6	7,22	98,2 %	0,2 %	48° 9' 26"	-66° 20' 55"	1050	263	60,25	1,207
Ouelle	22704	793	57,6	5,59	88,0 %	1,0 %	47° 22' 52"	-69° 57' 14"	1000	210	39,70	1,324
Petite Cascapédia	10902	1388	83,8	4,41	96,0 %	1,0 %	48° 13' 56"	-65° 43' 59"	1000	282	144,34	1,309
Rimouski	22002	1586	111,8	3,67	92,0 %	3,0 %	48° 24' 46"	-68° 33' 18"	1100	255	61,65	1,125
Sainte-Anne	21407	749	64	7,3	99,0 %	1,0 %	49° 2' 37"	-66° 28' 33"	1000	220	70,28	1,365
York	20404	662	80,2	5,2	97,9%	0,3 %	48° 48' 25"	-64° 54' 60"	1050	141	69,30	1,167
<i>Bouclier canadien</i>												
Aux Écorces	61020	1119	100,6	4,98	96,7 %	3,2 %	48° 10' 58"	-71° 38' 41"	1200	171	64,61	1,176
Batiscan	50304	4400	172	1,9	90,0 %	5,0 %	46° 36' 37"	-72° 22' 58"	1000	589	145,34	1,139
Coulonge	41301	5154	193,9	1,2	90,0 %	10,0 %	45° 52' 25"	-76° 41' 3"	1100	424	108,65	1,245
Croche	50135	1579	110,3	3,6	96,0 %	3,0 %	47° 46' 7"	-72° 44' 6"	1100	216	49,41	2,097
Désert	40841	1691	122,7	1,51	88,5 %	9,6 %	46° 35' 24"	-76° 2' 29"	900	123	37,02	1,537
Du Loup805	52805	781	48,3	5,23	92,0 %	8,0 %	46° 36' 2"	-73° 11' 10"	1000	95	47,66	1,330
Dumoine	41902	3792	165,3	1,43	86,5 %	11,8 %	46° 20' 47"	-77° 48' 56"	1000	198	156,53	1,163
Godbout	71401	1558	109,4	3,14	93,3 %	6,7 %	49° 19' 51"	-67° 39' 17"	1050	299	100,90	1,461
Maskinongé	52601	1023	87,5	5,1	81,3 %	5,6 %	46° 18' 4"	-73° 5' 46"	1000	118	34,74	1,397
Mékinac	50118	997	72,3	4,03	93,0 %	6,0 %	46° 53' 47"	-72° 43' 34"	1000	107	36,42	1,815
Métabetchouane	61502	2190	149,5	2,45	96,0 %	3,5 %	48° 22' 32"	-71° 59' 48"	950	290	107,55	1,181
Mistassibi	62101	9350	303,6	1,31	94,0 %	5,0 %	48° 53' 19"	-72° 16' 21"	900	1089	255,79	1,110
Mistassini	62102	9712	265,5	1,6	95,0 %	4,0 %	48° 53' 59"	-72° 12' 39"	900	1228	473,95	1,265
Petite Nation	40406	1404	95,4	1,24	81,0 %	15,0 %	45° 47' 27"	-75° 5' 22"	1000	91	135,37	1,466
Petite Péribonka	61801	1001	105,9	2	89,0 %	6,7 %	48° 48' 53"	-72° 2' 47"	900	116	50,15	1,483

Nom	ID	Superficie (km <sup>2</sup> )	Longueur (km)	Pente	Forêt (%)	Plans d'eau (%)	Latitude (Nord)	Longitude (Ouest)	Précipitations (mm)	Q <sub>2</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Largeur moyenne (m)	Sinuosité
Picanoc	40840	1272	95,8	1,31	88,9 %	7,1 %	46° 4' 41"	-76° 4' 10"	1000	96	33,54	1,996
Pikauba	61022	487	77,3	4,22	97,0 %	3,0 %	47° 56' 31"	-71° 22' 56"	1250	90	51,68	1,296
Rouge	40204	5460	225,8	1,44	90,1 %	8,0 %	45° 44' 18"	-74° 41' 21"	1000	549	115,59	1,286
Ste-Marguerite	62802	1101	100,9	8,52	95,2 %	4,5 %	48° 16' 5"	-69° 54' 30"	1000	250	78,99	1,744
Vermillon	50116	2614	151,3	1,46	91,0 %	9,1 %	47° 39' 20"	-72° 57' 44"	1000	240	113,09	1,635
<i>Basses-terres du Saint-Laurent</i>												
Acadie	30421	316	61,2	0,77	18,0 %	1,2 %	45° 23' 25"	-73° 22' 15"	1050	72	20,70	1,785
Achigan	52233	654	72,6	5,08	70,6 %	2,0 %	45° 50' 46"	-73° 29' 33"	1000	125	49,79	1,525
Bécancour	24007	2317	162,7	1,3	47,0 %	4,0 %	46° 11' 41"	-72° 17' 0"	1050	490	87,56	1,322
Châteauguay	30901	2463	114	4,3	31,0 %	3,0 %	45° 19' 49"	-73° 45' 44"	1000	419	104,67	1,220
Petit chêne du	23701	352	42,8	2,78	61,1 %	2,6 %	46° 30' 2"	-72° 6' 30"	1050	95	25,19	2,118

ID = Numéro d'identification

Q<sub>2</sub> = Débit de récurrence biennale

## 3.2 Description des variables analysées

### 3.2.1 Les variables hydrologiques

Dans la littérature scientifique, il est couramment admis que la largeur à plein bord est principalement influencée par le débit à plein bord dont la récurrence moyenne serait de deux ans. L'estimation de la récurrence de ces débits a été fondée sur la méthode régionale développée par Anctil et al. (1998) pour le Québec. Rappelons que cette méthode est utilisée par le Centre d'Expertise Hydrique du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques pour estimer les débits de différentes récurrences au Québec. Dans le cadre de ce travail, les rivières ont été sélectionnées entre autres selon la disponibilité des données hydrologiques. Les débits de récurrences de deux ans ont donc été estimés à partir des valeurs de débits moyens annuels. Il est important de préciser que la formule 6 n'est nécessaire qu'en cas de non-disponibilité des débits moyens annuels afin d'estimer ceux-ci, à partir de la superficie des bassins versants.

Les étapes d'estimation des débits par l'analyse régionale développée par Anctil et al. (1998) sont les suivantes :

- 1) Localiser la station (rivière) dans l'une de trois régions hydrologiques homogènes.
- 2) Estimer la moyenne des débits maximums annuels au moyen de la formule 6.
- 3) Estimer le quantile normalisé régional au moyen de la formule 7.
- 4) Calculer le débit au site du choix au moyen de la formule 8.

$$Q_m = 1.61S^{0.70} \quad (6)$$

- $Q_m$  est la moyenne des débits annuels maximums.
- $S$  est la superficie du bassin versant du site.



$$Q_T = \beta + \frac{\alpha}{\kappa} \{1 - [-\ln B]^\kappa\} \quad (7)$$

$$B = [(T - 1)/T] \quad (8)$$

- $Q_T$  est le quantile normalisé régional.
- $\kappa$  est le paramètre de forme de la loi GEV régionalisée.
- $\alpha$  est le paramètre de localisation de la loi GEV régionalisée.
- $\beta$  est le paramètre d'échelle.

Ces trois paramètres sont des fonctions des moyennes régionales des moments  $L$  normalisés.

- $T$  est la période de retour (récurrence) correspondant à un quantile donné.

$$Q_e = Q_T \cdot Q_m \quad (9)$$

- $Q_e$  est le quantile estimé correspondant à la période de retour  $T$ .

**Tableau 3.2**

Les valeurs des paramètres de la loi de Valeurs Extrêmes Généralisées (GEV) régionalisées dans les trois régions hydrologiques homogènes

Région hydrologique homogène	$\beta$	A	K
I	0.8397	0.2819	0.0086
II	0.8659	0.2754	0.0993
III	0.8910	0.2308	0.1173

Outre ces débits de crues, on a aussi tenu compte des débits moyens annuels et saisonniers printaniers ainsi que des moyennes des débits maximums journaliers annuels. L'utilisation des débits printaniers se justifie par le fait que plus de 50 % de l'écoulement survient au printemps au moment de la fonte de neige (Assani et Tardif, 2005). D'un point

de vue hydrogéomorphologique, on peut aisément postuler que le façonnement des chenaux de rivières se réalise principalement au printemps. De plus, c'est durant cette saison que les débits à pleins sont régulièrement atteints ou dépassés. Les données des débits des rivières analysées furent extraites du site web du Centre d'Expertise Hydrique du Québec.

### **3.2.2 Les variables physiographiques**

Le choix des variables physiographiques a été effectué selon la disponibilité de leurs données. Ces variables ont été classées en trois groupes.

Le premier groupe est constitué par des variables qui décrivent les caractéristiques topographiques et l'affectation des sols des bassins versants et des chenaux. Il s'agit des variables suivantes : la superficie totale du bassin versant (en km<sup>2</sup>) et la longueur totale des chenaux (en km), de la pente moyenne du bassin versant (en %), le nombre d'îlots et des bancs dans le chenal (à partir des orthophotos), les précipitations totales annuelles (mm), de la superficie des forêts dans les bassins versants ainsi que celle occupée par les lacs et marais (en %). Le nombre d'îlots et de bancs a été relevé directement sur les orthophotos numérisées, les valeurs des autres variables physiographiques ont été tirées de la publication de Belzile et al. (1997). Les méthodes utilisées pour mesurer les données de ces différentes variables sont expliquées en détail par ces auteurs dans leur ouvrage.

Le second groupe est constitué par des variables qui définissent les trois grandes formations géologiques dans le bassin versant du fleuve Saint-Laurent. Il s'agit des variables qualitatives contrairement aux précédentes variables qui sont toutes quantitatives. Ainsi, le code 01 sera assigné à toutes les rivières dont plus de 70 % de la superficie de leurs bassins versants est entièrement circonscrite dans le Bouclier canadien. Le code 02 sera attribué à toutes les rivières dont plus de 70 % de leur superficie est localisée sur les Appalaches. Enfin, pour les Basses-terres du Saint-Laurent, on attribuera le code 03 pour les rivières dont plus 70 % de la superficie de leurs bassins versants se situe dans cette formation.

Le dernier groupe regroupe les variables qui définissent les coordonnées géographiques des stations de jaugeage des débits, à savoir la latitude et la longitude. Ces variables traduisent implicitement les caractéristiques climatiques des bassins versants au Québec.

#### Détermination de la largeur moyenne à plein bord.

Cette détermination a été effectuée en deux étapes : l'analyse cartographique et le tracé des perpendiculaires sur les cartes pour calculer la largeur moyenne à plein bord.

##### ***3.2.2.1 Analyse cartographique***

La première étape de l'analyse cartographique fut le traçage des berges pour les 49 rivières à l'étude. Pour tracer les rives, les orthophotographies aériennes de l'inventaire écoforestier du Québec méridional (produites entre 2002 et 2017) furent utilisées avec le logiciel ArcGis. Ces images ont été fournies par le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). La résolution est de 30 cm et la précision planimétrique de 2 m (les mesures effectuées pour le cadre de ce projet sont donc validées afin d'obtenir les données morphologiques des cours d'eau pour chaque rivière.) Des classes d'entités linéaires (polylines) ont pu être créées en traçant avec précision la limite supérieure des chenaux par photo-interprétation où il y a rupture de la végétation et la trace laissée par les plus hautes eaux naturelles sur chaque côté de la rive, donc à capacité à plein bord. (Figure 3.4).



**Figure 3.4** Exemple cartographique de la vectorisation de la limite supérieure des chenaux.

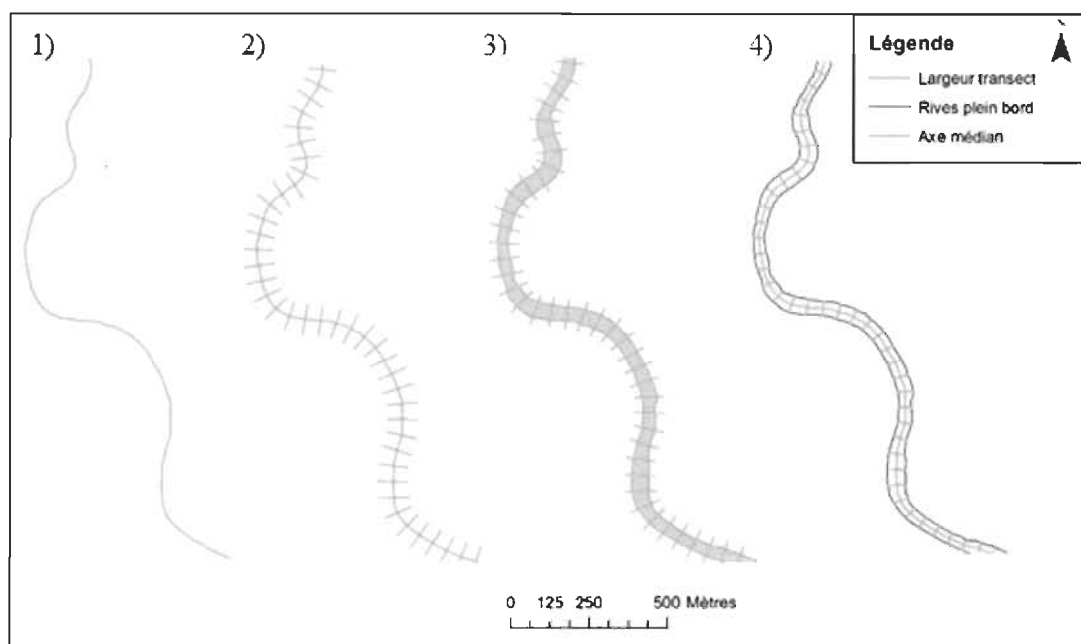
À la suite de la vectorisation des rives, on a pu générer un axe médian central correspondant au chenal du cours d'eau à l'aide de la fonction « TIN » du logiciel ArcGIS (Figure 3.5). Cette fonction permet de faire une interpolation linéaire entre les vecteurs de la limite du chenal, en attribuant une valeur d'égale distance à ceux-ci, dans notre cas les valeurs de 1 et 3 furent attribuées à chacune des rives (gauche et droite) par la suite, un axe fut produit à la valeur médiane (valeur de 2) de l'interpolation entre les rives au moyen de la fonction « Contour ».



**Figure 3.5** Classe d'entité linéaire représentant chaque rive du chenal (valeur 1 et 3) et l'axe médiant créée (valeur de 2).

La deuxième étape de l'analyse des orthophotographies pour calculer la largeur à plein bord a consisté à tracer des perpendiculaires selon l'approche développée à l'Université du Québec à Trois-Rivières, déjà largement utilisée et décrite dans de nombreux précédents travaux (p. ex., Alibert et al., 2012; Aubry et al., 2013; Vadnais et al., 2012). Des segments perpendiculaires ont été générés automatiquement sur une distance de 10 km en amont de la station hydrométrique, à chaque 50 m au moyen de l'outil complémentaire « Transect tool » intégré au logiciel ArcGIS version 10.5 (Cooley et Ferreira, 2015, GIS4Geomorphology: <http://gis4geomorphology.com/> (consulté en janvier 2017). Ce module permet la création automatique de perpendiculaires à une distance fixe par rapport à une « polyline », étant ici le fichier représentant la géométrie

de l'écoulement, l'axe médian du chenal. Ensuite, les perpendiculaires ont été découpées en fonction de la limite des chenaux, dans le présent cas, les classes d'entités linéaires associées à chaque rive, ce qui a résulté en la création des segments représentant la largeur à plein bord du chenal (Figure 3.6).



**Figure 3.6** Étapes pour générer automatiquement les segments perpendiculaires.

Pour déterminer la moyenne de la largeur à plein bord, on a procédé par le calcul d'une simple moyenne arithmétique de toutes les mesures de la largeur à plein bord en amont de la station hydrométrique. Toutefois, ces moyennes ont été calculées sur des tronçons homogènes de chenaux, c'est-à-dire des tronçons ne présentant pas une variabilité spatiale (longitudinale) significative de la largeur à plein bord.

### 3.2.3 Calcul de la sinuosité

En ce qui concerne le calcul de la sinuosité, la classe d'entité linéaire représentant le chenal du cours d'eau (axe médian) a servi à mesurer la sinuosité du chenal au moyen de l'indice classique de sinuosité défini par Schumm (1969).

$$S = L/l \quad (10)$$

Dans cette équation, S représente la sinuosité et est défini par le ratio de la longueur réelle sur la longueur géométrique. « L » est la longueur réelle du chenal alors que « l » est la longueur à vol d'oiseau entre les deux extrémités du tronçon. À l'instar de la moyenne de la largeur à plein bord, la sinuosité a été calculée sur une distance de 10 km.

Enfin, il importe de mentionner que Reinfelds (1997) avait démontré que les valeurs des largeurs à plein bord mesurées à partir des photographies aériennes et celles mesurées directement sur le terrain étaient concordantes.

### **3.3 Analyses statistiques des données**

L'analyse statistique sera effectuée en trois étapes suivantes :

- 1) La détermination des tronçons homogènes des chenaux.
- 2) L'identification des facteurs hydrologiques et physiographiques qui influencent la variabilité spatiale de la largeur moyenne en plein bord et de la sinuosité.
- 3) La sélection de la variable la mieux corrélée à la largeur moyenne à plein bord pour estimer cette variable sur les rivières non analysées et en aval des barrages afin de pouvoir quantifier leurs impacts sur cette variable.

#### **3.3.1 Méthode d'analyse de la variabilité longitudinale de la moyenne de la largeur à plein bord**

Pour vérifier la théorie de géométrie hydraulique, les travaux antérieurs se limitaient à mesurer la largeur à plein bord d'une station à l'autre le long des cours d'eau sans s'intéresser à la moyenne de cette largeur. Ainsi, ces études ne permettaient pas de vérifier si la moyenne de cette largeur variait longitudinalement. Contrairement à ces travaux, notre étude se fonde tout d'abord sur l'analyse de la variabilité longitudinale de la moyenne de la largeur à plein bord afin de vérifier si cette moyenne varie ou pas le long

d'un cours d'eau. Cette vérification a été effectuée sur une distance de 10 km pour toutes les rivières analysées à partir de la station hydrométrique et en remontant vers l'amont.

Pour vérifier la variabilité longitudinale de la moyenne de la largeur à plein bord de chaque rivière, on a appliqué le test de Lombard. Contrairement aux tests sur le changement des moyennes d'une série statistique de données, le test de Lombard permet de détecter la rupture abrupte ou progressive de la moyenne d'une série statistique. C'est un test général appliqué pour détecter les deux types de changements de moyenne. Il a été déjà décrit largement dans les travaux antérieurs (p. ex., Aubry et al., 2014; Vadnais et al., 2012). Supposons une série d'observations dénotées  $X_1, \dots, X_n$ , où  $X_i$  est l'observation prélevée au temps  $T = i$ . Ces observations sont supposément indépendantes. Une question intéressante consiste à vérifier si la moyenne de cette série a changé. Si  $\mu_i$  se réfère à la moyenne théorique de  $X_i$ , alors un scénario possible est donné par le « smooth-change model » de Lombard, c'est-à-dire :

$$\mu_i = \begin{cases} \theta_1 & \text{if } 1 \leq i \leq T_1 \\ \theta_1 + \frac{(i - T_1)(\theta_2 - \theta_1)}{T_2 - T_1} & \text{if } T_1 < i \leq T_2 \\ \theta_2 & \text{if } T_2 < i \leq n \end{cases} \quad (11)$$

En d'autres mots, le changement de moyenne se fait de façon graduelle à partir de  $\theta_1$  jusqu'à  $\theta_2$  entre les temps  $T_1$  et  $T_2$ . Un cas particulier est la rupture abrupte lorsque  $T_2 = T_1 + 1$ .

Afin de vérifier formellement si la moyenne d'une série est stable ou suit plutôt le modèle (10 première équation), on peut utiliser la procédure introduite par la méthode statistique de Lombard (1987). À cette fin, soit  $R_i$  le rang de  $X_i$  parmi  $X_1, \dots, X_n$ . Prenons la fonction de score de Wilcoxon  $\phi(u) = 2u - 1$  et définir le score de  $X_i$  par :

$$Z_i = \frac{1}{\sigma_\phi} \left\{ \phi \left( \frac{R_i}{n+1} \right) - \bar{\phi} \right\}, \quad i \in \{1, \dots, n\} \quad (12)$$



Où

$$\phi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \phi \left( \frac{i}{n+1} \right) \quad \text{et} \quad \sigma_{\phi}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \phi \frac{i}{n+1} - \bar{\phi} \right\}^2 \quad (13)$$

Le test statistique de Lombard est :

$$S_n = \frac{1}{n} \sum_{T_1=1}^{n-1} \sum_{T_2=T_1+1}^n L_{T_1 T_2}^2 \quad (14)$$

Où

$$L_{T_1 T_2} = \sum_{j=T_1+1}^{T_2} \sum_{i=1}^j Z_i \quad (15)$$

Au niveau de confiance de 5 % et 10 %, on conclut que la moyenne de la série change de manière significative selon un modèle de la forme (1) lorsque  $S_n > 0.0403$  et 0.0287, respectivement. Les deux valeurs correspondent aux valeurs théoriques (critiques) (voir Lombard, 1987) définissant les seuils de signification (à 5 et 10 %) pour le test. Lorsqu'il s'agit de données spatiales (comme la largeur de canal), les variables de temps  $T_1$  et  $T_2$  peuvent être remplacées dans l'équation (11) par des variables de distance  $D_1$  et  $D_2$ . Le test a été appliqué aux séries non autocorrélées.

### 3.3.2 Analyse de la relation entre les variables morphologiques (largeur à plein bord et sinuosité et les variables indépendantes)

Afin de pouvoir déterminer les facteurs qui influencent la variabilité spatiale (longitudinale) de la largeur à plein bord et de la sinuosité, on a appliqué l'analyse canonique de corrélation entre ces deux variables morphologiques et les 15 variables indépendantes décrites aux sous-sections 3.3.1 et 3.3.2. Cette méthode d'analyse multivariée a été déjà aussi décrite en détail les travaux antérieurs (p. ex., Matteau et al., 2008). Le choix de cette méthode multidimensionnelle se justifie par le fait qu'elle combine les méthodes de régression multiples et discriminantes. Elle décrit en détail

notamment par Afifi et Clark (1996). De fait, l'analyse des corrélations canoniques crée des paires de combinaisons linéaires entre chaque groupe de variables physiographiques ( $X_j$ ) et morphologiques des cours d'eau ( $Y_k$ ) appelées variables canoniques, de manière à ce que la corrélation entre les variables d'une même paire soit maximisée et que la corrélation entre les variables de deux paires différentes soit nulle.

Considérons les  $p$  variables indépendantes  $X_j$  ( $j = 1, \dots, p$ ) et les  $q$  variables dépendantes (largeur et sinuosité)  $Y_k$  ( $k = 1, \dots, q$ ) et  $X_j^0$  et  $Y_k^0$  leurs variables standardisées respectives. Pour chacun de ces groupes de variables standardisées, les variables canoniques sont calculées de la façon suivante.

$$w_l = a_{1l}x_1^0 + a_{2l}x_2^0 + \dots + a_{pl}x_p^0 \quad (16)$$

$$v_l = b_{1l}y_1^0 + b_{2l}y_2^0 + \dots + b_{ql}y_q^0 \quad (17)$$

La valeur maximale de  $l$  correspond au nombre de variables appartenant au plus petit groupe (les deux variables indépendantes)

Les coefficients de corrélation canonique  $a_{il}$  et  $b_{kl}$  sont calculés selon les deux critères (17) et (18) :

$$\text{Corr}(w_{l+1}, v_{l+1}) < \text{Corr}(w_l, v_l) \quad (18)$$

$$\text{Corr}(w_l, w_{l'}) = 0, \text{corr}(v_l, v_{l'}) = 0 \text{ et } \text{corr}(w_l, v_{l'}) = 0 \text{ si } l' \neq l \quad (19)$$

L'analyse canonique a permis ainsi de déterminer les variables indépendantes les mieux corrélées à la largeur moyenne et à la sinuosité calculées sur la distance de 10 km. On n'a pas tenu compte des ruptures de la moyenne de la largeur à plein bord dans ce calcul. En ce qui concerne la variable Géologie (GL), on a classifié les trois régions géologiques en trois catégories (variables qualitatives) suivantes : 1 (Bouclier canadien),

2 (Les Appalaches) et 3 (Les Basses-terres du Saint-Laurent). La transformation logarithmique a été appliquée à certaines variables indépendantes pour les normaliser.

Des coefficients de corrélations linéaires sont ensuite calculés entre les variables de chacun des groupes originaux et leurs variables canoniques correspondantes pour obtenir ce que certains auteurs appellent des coefficients de structure, de même qu'entre les variables originales d'un groupe et les variables canoniques du groupe opposé. L'identification des facteurs influençant les variables morphologiques se fait en trois étapes :

- 1) Identifier quelles paires de variables canoniques (VI,WJ) sont significatives au seuil de probabilité de 5 %;
- 2) Pour chacune des variables morphologiques  $y$ , identifier lesquelles sont significativement corrélées aux axes canoniques (coefficients de structure significatifs).
- 3) Pour chacune des variables  $y$  identifiées à l'étape précédente, jumeler cette variable aux caractéristiques physiographiques et hydrologiques  $x$  de la variable canonique  $w$  correspondante.

L'analyse de corrélation canonique tient compte simultanément de toutes les variables morphologiques et de tous les facteurs physiographiques et hydrologiques susceptibles de les influencer en mettant en évidence les liens entre les variables morphologiques entre elles et les facteurs explicatifs entre eux.

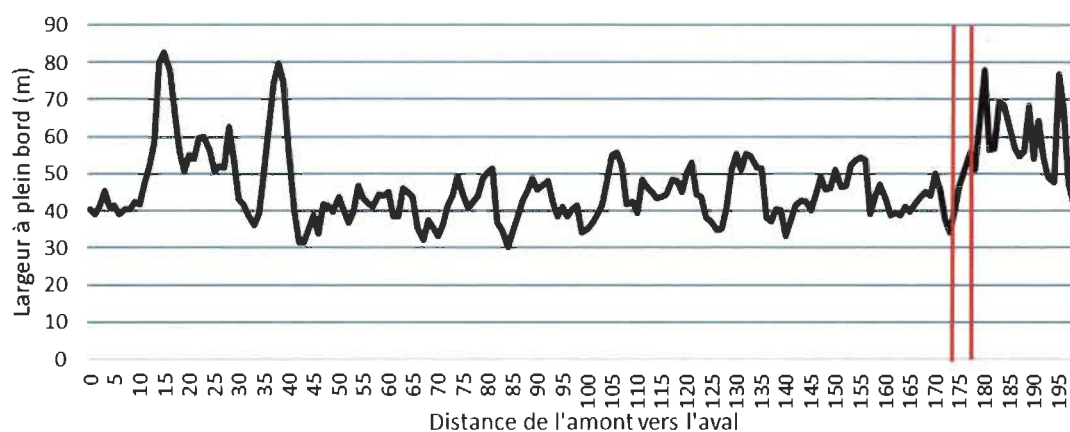
Enfin, la dernière étape de l'analyse statistique a consisté à établir les équations de régression au moyen de la fonction puissance entre les variables indépendantes les mieux corrélées et les deux variables morphologiques (la largeur à plein bord et la sinuosité) afin de pouvoir comparer les valeurs des coefficients des équations de la fonction puissance à celles établies dans d'autres régions du monde dans le cadre de la théorie de la géométrie hydraulique.

## CHAPITRE IV

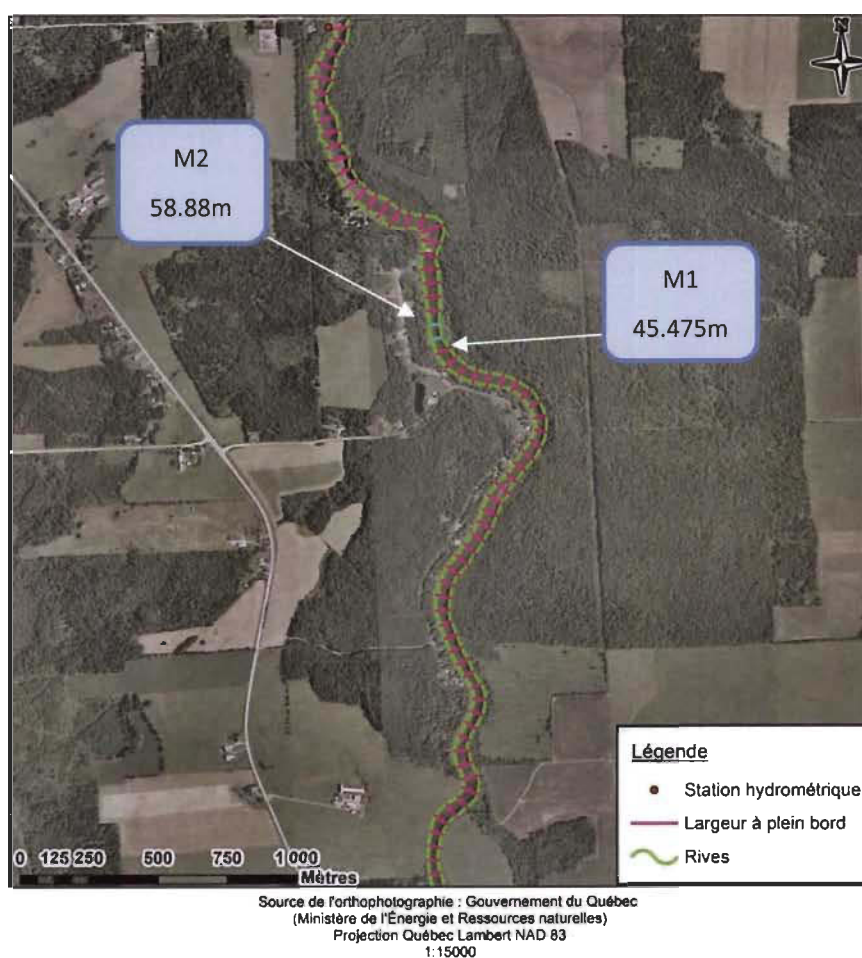
### RÉSULTATS

#### 4.1 Variabilité longitudinale des largeurs à plein bord

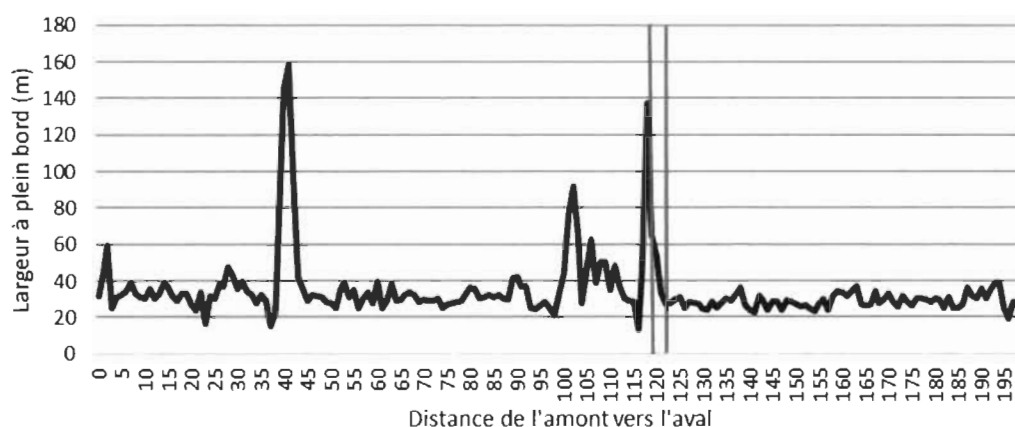
Les résultats complets du test de Lombard appliqué à l'analyse de la variabilité longitudinale des moyennes de la largeur à plein bord sont présentés au tableau 4.1 et leur synthèse, au tableau 4.2. Sur la même distance équivalente de 10 km, ce tableau révèle que toutes les rivières ne présentent pas un changement statistiquement significatif des moyennes de leur largeur à plein bord. En d'autres termes, les moyennes de la largeur à plein bord n'augmentent pas significativement longitudinalement (de l'amont vers l'aval) contrairement aux prédictions de la théorie de la géométrie hydraulique. De fait, trois cas de variabilité longitudinale sont observés. 45 % des rivières analysées sont caractérisées par une hausse significative de la moyenne de la largeur à plein bord de l'amont à l'aval (Figure 4.1). Cette hausse varie entre 16 % (rivière Beaurivage) dans les Appalaches et 76 % (rivière Petite Nation) sur le Bouclier canadien. La proportion des rivières caractérisées par cette hausse est semblable dans les trois régions géologiques. 31 % des rivières sont caractérisées par une baisse des moyennes de la largeur à plein bord (Figure 4.3). Cette baisse varie entre 19 % (rivière Bonaventure) et 444 % (rivière Petite Cascapédia), toutes deux s'écoulant dans les Appalaches. Toutefois, la proportion des rivières caractérisées par une baisse de la moyenne est plus élevée sur le Bouclier canadien que dans les Appalaches. Enfin, 24 % ne présentent aucun changement significatif de la moyenne de la largeur à plein bord. Cette proportion est comparable dans les trois régions géologiques (Tableau 4.1).



**Figure 4.1 Variabilité longitudinale de la largeur à plein bord de la rivière Eaton.**  
Les deux barres rouges indiquent la zone de rupture de la moyenne de la largeur à plein bord.

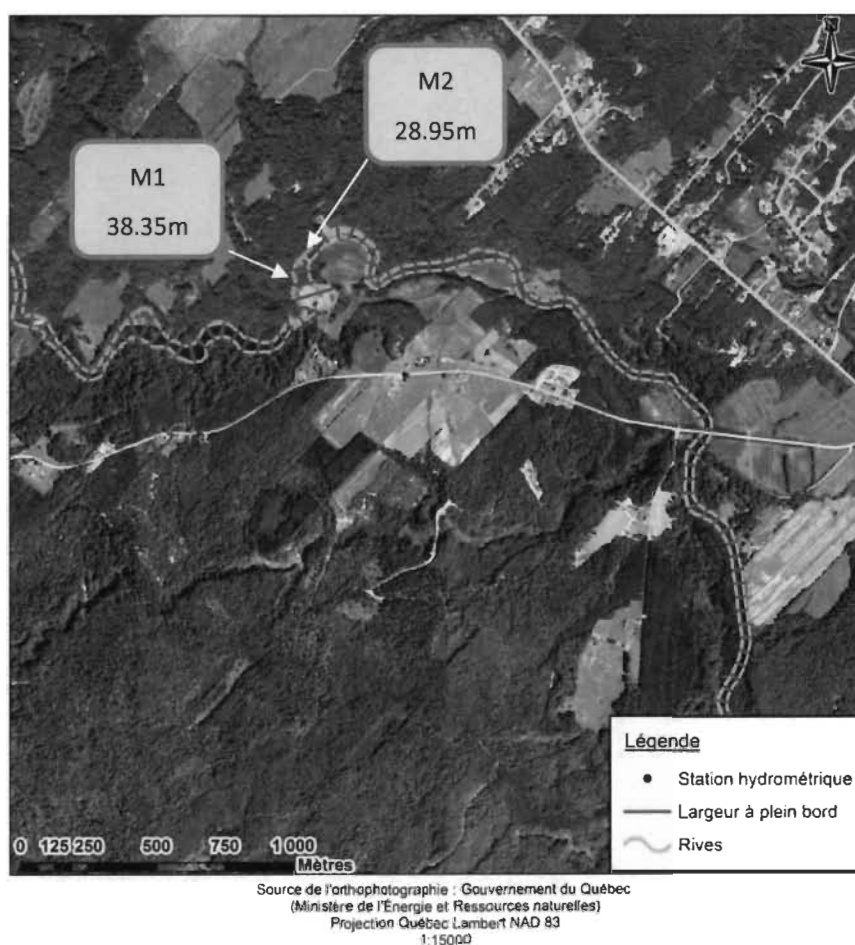


**Figure 4.2 Vue en plan de la variabilité longitudinale de largeur à plein bord de la rivière Eaton.**  
M1 et M2 représentent les ruptures du test Lombard.



**Figure 4.3 Variabilité longitudinale de la largeur à plein bord de la rivière Maskinongé.**

Les deux barres rouges indiquent la zone de rupture de la moyenne de la largeur à plein bord.



**Figure 4.4 Vue en plan de la variabilité longitudinale de largeur à plein bord de la rivière Maskinongé.**

M1 et M2 représentent les ruptures du test Lombard.

**Tableau 4.1**

Variabilité longitudinale de la largeur à plein bord – Résultats du test de Lombard

Rivières	S <sub>n</sub>	D1 (m)	D2 (m)	MW1 (m)	MW2 (m)	MR (m)	R (%)
<i>Les Appalaches</i>							
Au Saumon	0.2978	3850	3950	45.1	59.6	54	24 %
Beaurivage	0.7774	4950	6750	36.0	42.9	37.9	16 %
Blanche	0.2761	2500	2650	10.7	17.2	15.3	38 %
Bonaventure	0.0416	6500	6550	67.3	56.6	63.6	-19 %
Cap-Chat	0.4989	5900	5950	76.5	36.7	60.5	-109 %
Cascapédia	0.8014	50	8400	77.6	148.0	89.6	48 %
Coaticook	0.4298	3500	5000	25.1	30.1	27.8	17 %
Dartmouth	0.038					59.8	
Des Trois-Pistoles	0.0068					46.4	
Du Loup507	0.0362					30.6	
Du Sud	0.0204					70.5	
Eaton	0.0579	8700	8850	45.5	58.9	47	23 %
Etchemin	0.0176					84.1	
Madeleine	0.1192	3000	3100	76.2	48.4	56.6	-57 %
Matane	0.4573	2200	4100	53.7	69.6	64.4	23 %
Matapédia	0.7113	800	4150	44.2	92.1	80.9	52 %
Nicolet	0.0955	600	800	258.4	85.6	95.8	-202 %
Nicolet-Sud	0.1204	50	1850	44.8	32.5	35.1	-38 %
Nouvelle	0.0038					60.2	
Ouelle	0.465	4500	4650	32.5	45.9	39.7	29 %
Petite Cascapédia	0.7057	2100	2350	406.5	74.8	144.3	-444 %
Rimouski	0.3505	5200	8450	55.1	78.7	61.6	30 %
Sainte-Anne	0.7753	2750	6150	47.8	96.9	70.3	51 %
York	0.0251					69.3	
<i>Bouclier canadien</i>							
Aux Écorces	0.2356	6450	6500	51.8	89.3	64.6	42 %
Batiscan	0.5673	1400	5100	115.0	161.2	145.3	29 %
Coulonge	0.1036	2850	3000	129.8	100.3	108.7	-29 %
Croche	0.0707	2050	2100	42.4	51.3	49.4	17 %
Désert	0.0103					37	
Du Loup805	0.0198					47.7	
Dumoine	0.2323	5950	6000	105.1	253.9	156.5	59 %

Rivières	S <sub>n</sub>	D1 (m)	D2 (m)	MW1 (m)	MW2 (m)	MR (m)	R (%)
Godbout	0.3361	7100	7200	119.9	54.1	100.9	-122 %
Maskinongé	0.1692	6050	6100	38.4	28.9	34.7	-33 %
Mékinac	0.0902	5250	5300	38.9	33.1	36.4	-17 %
Métabetchouane	0.5952	4750	7350	85.5	152.7	107.5	44 %
Mistassibi	0.0613	7150	7200	270.6	217.2	255.8	-25 %
Mistassini	0.4728	4050	4100	738.7	278.5	473.9	-165 %
Petite Nation	0.3026	2200	4500	46.7	195.2	135.4	76 %
Petite Péribonka	0.3215	2200	2350	33.2	54.8	50.1	39 %
Picanoc	0.0033					33.5	
Pikauba	0.5849	6300	6400	35.3	77.2	51.7	54 %
Rouge	0.0263		0			115.6	
Ste-Marguerite N-E	0.0459	500	650	48.5	81.0	79	40%
Vermillon	0.3309	1650	1800	229.9	90.1	113.1	-155 %
<i>Basses-terres du Saint-Laurent</i>							
Acadie	0.5065	700	5200	15.7	23.3	20.7	33 %
Achigan	0.25	3800	3850	60.4	42.9	49.8	-41 %
Bécancour	0.0381		0			87.6	
Châteauguay	0.2647	6600	7750	120.0	72.4	104.7	-66 %
Petit chêne du	0.1834	1950	2000	20.2	26.3	25.2	23 %

S<sub>n</sub> = valeur calculée de la statistique du test de Lombard. D1 = la longueur totale du tronçon situé en amont de la section qui marque la rupture de la moyenne de la largeur à plein bord; D2 = la longueur totale du second tronçon situé en aval de la section qui marque la rupture de la moyenne de la largeur à plein bord; MW1 = la moyenne de la largeur à plein bord du premier tronçon; MW2 = la moyenne de la largeur à plein bord du second tronçon; MR = la moyenne de la largeur à plein bord de tout le tronçon de 10 km; R = taux d'augmentation (+) ou de diminution (-) de la moyenne de la largeur à plein bord.



**Tableau 4.2**

Comparaison de la fréquence (%) de types de changements des moyennes de la largeur à plein bord en fonction des régions physiographiques au Québec méridional – Résultats du test de Lombard

Régions physiographiques	Sans changement de la moyenne	Avec changement de la moyenne		Total de changement
		Baisse	Hausse	
Appalaches	29	25	46	71
Bouclier canadien	20	35	45	80
Basses-terres du Saint-Laurent	20	40	40	80
Les trois régions	24	31	45	76

#### **4.2 Comparaison des moyennes de la sinuosité des trois régions physiographiques**

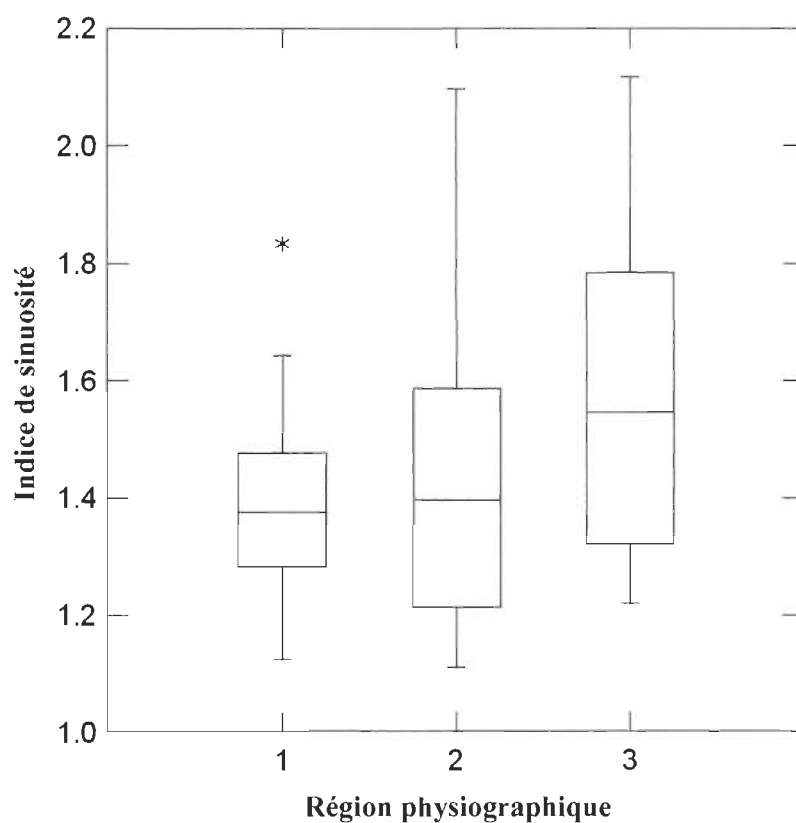
Contrairement à la largeur à plein bord, la sinuosité ne pouvait pas faire l'objet d'une analyse de la variabilité longitudinale pour la simple raison qu'une seule valeur de sinuosité a été calculée par rivière. Toutefois, malgré la différence de la taille des bassins versants entre les trois régions physiographiques, on a comparé les valeurs moyennes de la sinuosité en fonction des régions physiographiques au moyen de l'analyse de variance à un seul critère (Tableau 4.3). Ces moyennes sont présentées à la figure 4.5. L'analyse de variance n'a révélé aucune différence significative des moyennes de la sinuosité des chenaux de rivières entre ces trois régions même si la sinuosité des rivières des Basses-terres du Saint-Laurent tend à être plus élevée que celles des rivières de deux autres régions physiographiques.

**Tableau 4.3**

Comparaison des moyennes de la sinuosité des rivières de trois régions physiographiques – Résultats de l'analyse de variance avec un seul critère de classification

Source	SM	DL	CM	F	P
Géologie	0,184	2	0,092	1,542	0,225
Erreur	2745	46	0,06		

SM = Somme des carrés DL = Nombre de degrés de liberté; F = valeur calculée du test de Fisher-Snedecor; p = seuil critique calculé. Le test est statistiquement significatif lorsque la valeur de  $p < 0,05$ .



**Figure 4.5** Comparaison des moyennes de la sinuosité des rivières des trois régions physiographiques au moyen de l'analyse de variance à un seul critère.

1 = Appalaches, 2 = Bouclier canadien, 3 = Basses-terres du Saint-Laurent.

**Tableau 4.4**

Moyennes et écarts types de la sinuosité pour les trois régions physiographiques

Région physiographique	Moyenne	Écart type	Nombre de stations
1	1.386	0.05	24
2	1.441	0.055	20
3	1.594	0.109	5

### 4.3 Relation entre les facteurs physio-climatiques et les variables morphologiques

Les valeurs des coefficients de structure de l'analyse canonique des corrélations calculées entre les deux groupes de variables sont consignées dans le tableau 4.5. Pour la largeur à plein bord, on a considéré la moyenne calculée sur la distance de 10 km. On n'a pas tenu compte des ruptures de moyennes dans le cadre de cette analyse canonique. Rappelons que l'axe canonique W1, extrait du groupe des variables morphologiques dépendantes, est corrélé à l'axe canonique V1, extrait du groupe des variables indépendantes; W2 est corrélé à V2. De même, la largeur à plein bord est fortement corrélée à W1 et la sinuosité, à W2. La superficie du bassin versant est la variable la mieux corrélée à W2, suivie des débits et, dans une moindre mesure, de la longueur du cours d'eau. Toutes ces variables sont corrélées positivement à V1. Quant à V2, il est corrélé négativement à la géologie, et dans une moindre mesure, à la superficie des lacs et marais. À la lumière de ces considérations, il s'ensuit que la largeur à plein bord des chenaux est principalement corrélée positivement à la superficie des bassins versants et des débits. Quant à la sinuosité, elle est principalement corrélée négativement aux trois régions physiographiques (géologie).

**Tableau 4.5**

Coefficients de structure calculés entre les groupes des variables  
dépendantes et indépendantes

<b>Variables</b>	<b>W1</b>	<b>W2</b>	<b>V1</b>	<b>V2</b>
Largeur	<b>0.999</b>	0.011		
Sinuosité	-0.578	<b>0.816</b>		
SUPERFICIE			<b>0.905</b>	-0.087
LONGUEUR			<b>0.799</b>	-0.255
PENTE			-0.219	0.148
Q <sub>2</sub>			<b>0.864</b>	0.167
Q <sub>MAX</sub>			<b>0.872</b>	0.180
Q <sub>PRT</sub>			<b>0.853</b>	0.179
FORÊT			0.224	0.141
MARRAIS			0.264	-0.527
LAT			0.219	0.135
LONG			-0.074	0.557
PRÉCIPITATIONS			-0.275	0.415
BANCS			0.075	0.479
ÎLOTS			0.382	-0.189
BANCS+ÎLOTS			0.166	0.415
GÉOLOGIE*			0.105	<b>-0.759</b>
VE (%)	66,60 %	33,30 %	27,86 %	13,32 %

En gras : Valeurs significatives à 95 %, VE = variance expliquée, \*= données qualitatives.

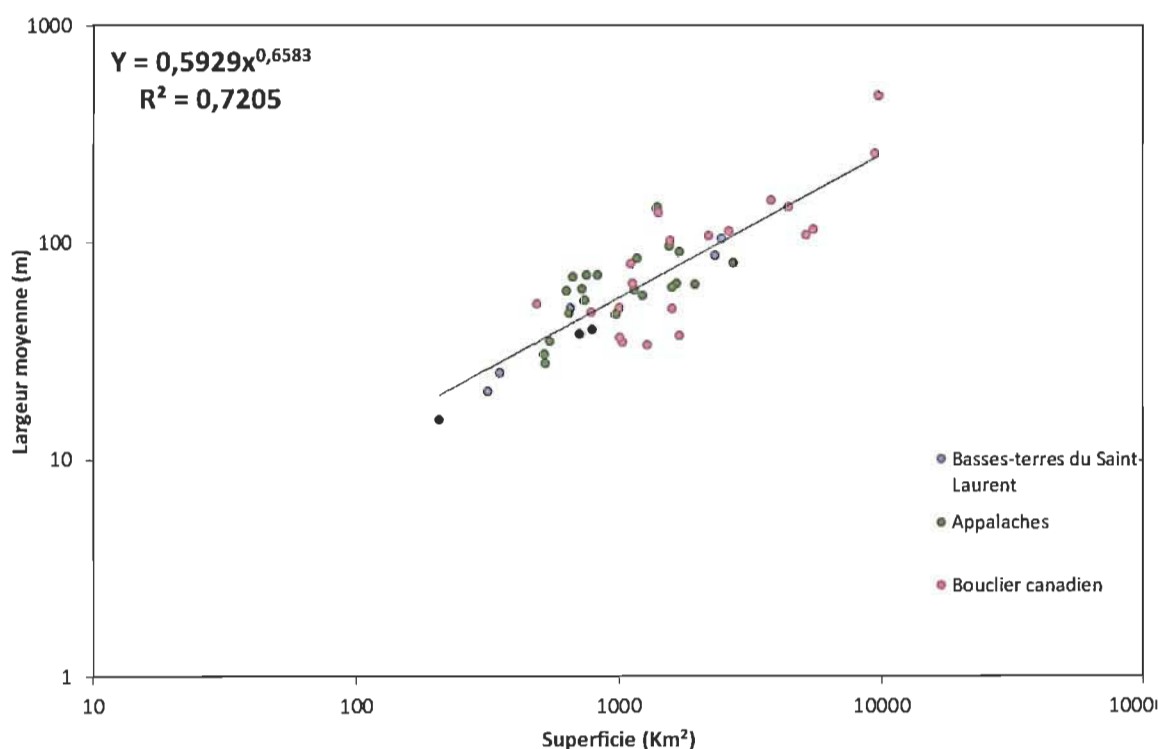
#### **4.4 Analyse de régressions**

##### **4.4.1 Largeur à plein bord**

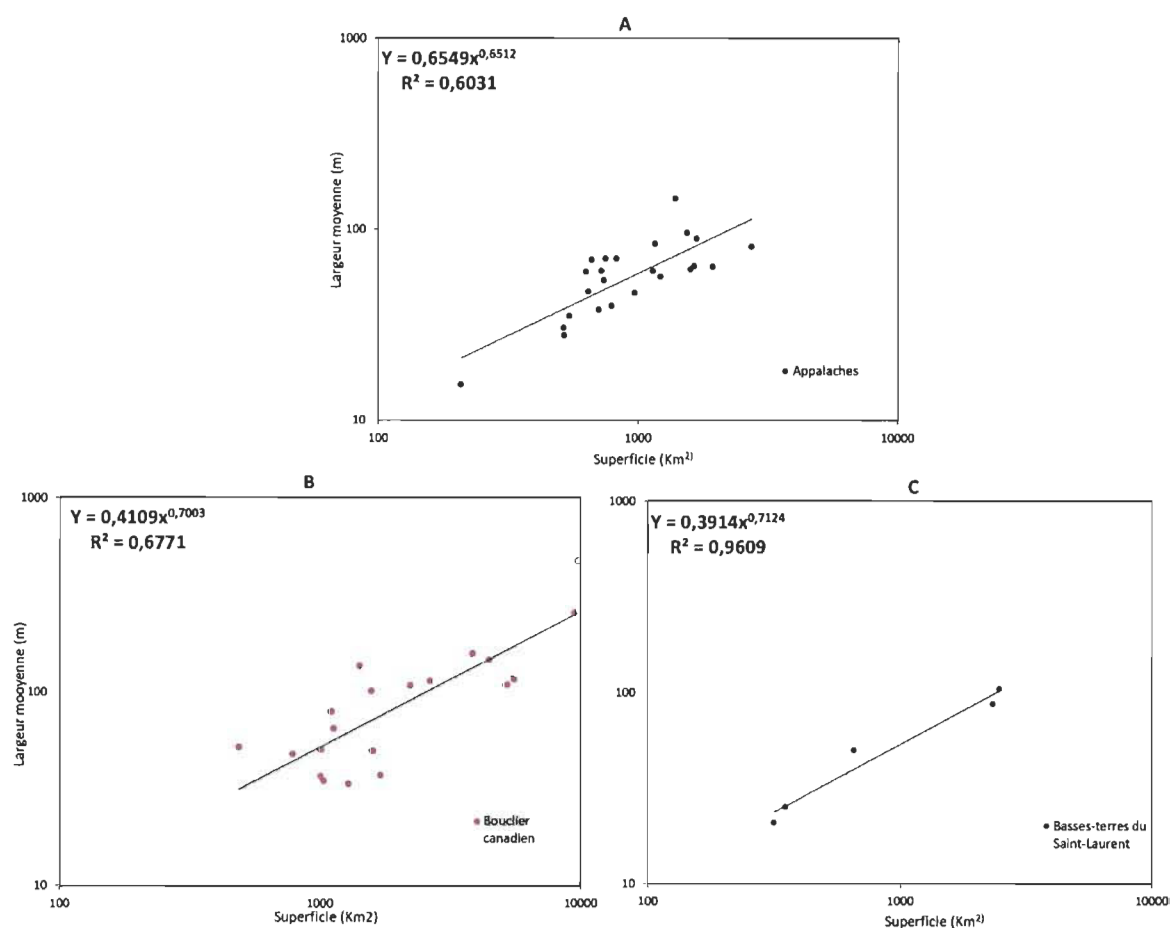
L'analyse canonique des corrélations a mis en évidence une forte corrélation entre la superficie des bassins versants, les débits de rivières et les moyennes de la largeur à plein bord des chenaux. Dans le cadre de la théorie de la géométrie hydraulique, on a ainsi calculé une régression de type puissance entre la superficie des bassins versants et les

moyennes de la largeur à plein bord, d'une part, et entre ces dernières et les débits de récurrence de deux ans, d'autre part. Cette régression (puissance) a été calculée d'abord pour l'ensemble de données et ensuite pour chacune des trois régions physiographiques. Les résultats de cette analyse sont présentés aux figures 4.6 et 4.7 pour les superficies des bassins versants et 4.8 et 4.9 pour les débits de récurrence de deux ans.

Toutes ces figures démontrent clairement l'existence d'une relation puissance statistiquement significative entre les deux variables physiographiques et les moyennes de la largeur à plein bord aussi bien à l'échelle de tout le Québec méridional qu'à celle de chacune de trois régions physiographiques. Le plus fort lien ( $R^2 = 0,98$ ) a été observé dans les Basses-terres du Saint-Laurent. Toutefois, le nombre de rivières y est beaucoup plus faible que celui de deux autres régions physiographiques.



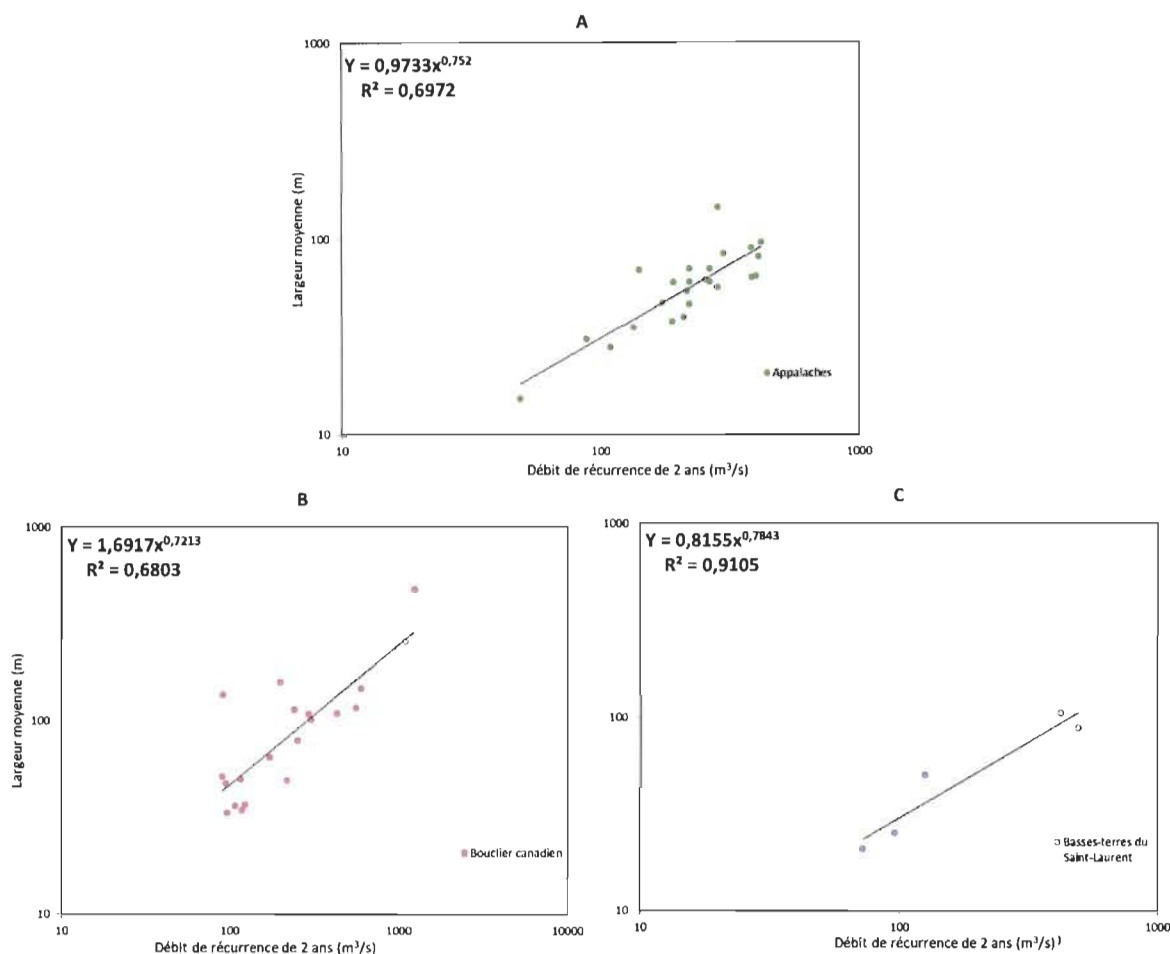
**Figure 4.6** Relation entre la superficie des bassins versants et la moyenne de la largeur à plein bord dans les trois régions physiographiques.



**Figure 4.7** Relation entre la superficie et la moyenne de la largeur à plein bord pour chaque région physiographique.

A = Appalaches; B = Bouclier canadien; C = Basses-terres du Saint-Laurent.





**Figure 4.9** Relation entre le débit de récurrence de deux ans et la moyenne de la largeur à plein bord.

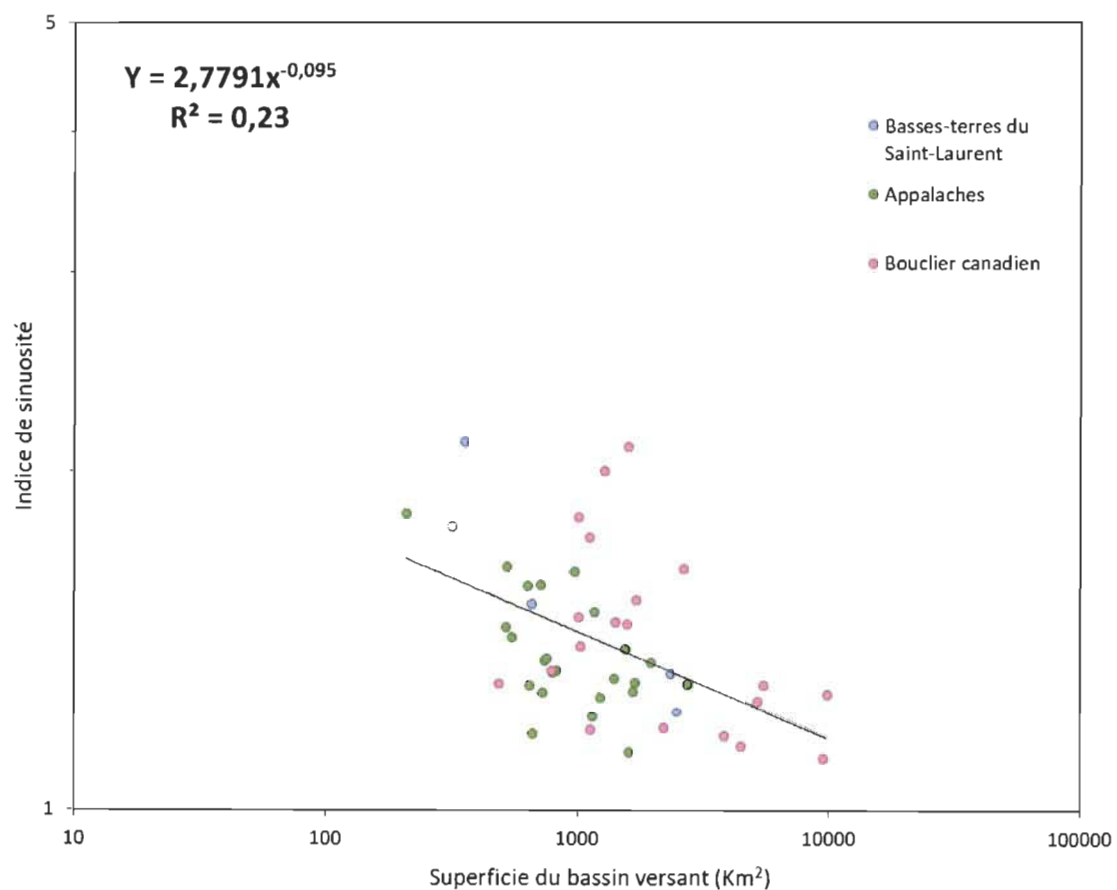
A = Appalaches; B = Bouclier canadien; C = Basses-terres du Saint-Laurent.

#### 4.4.2 Sinuosité

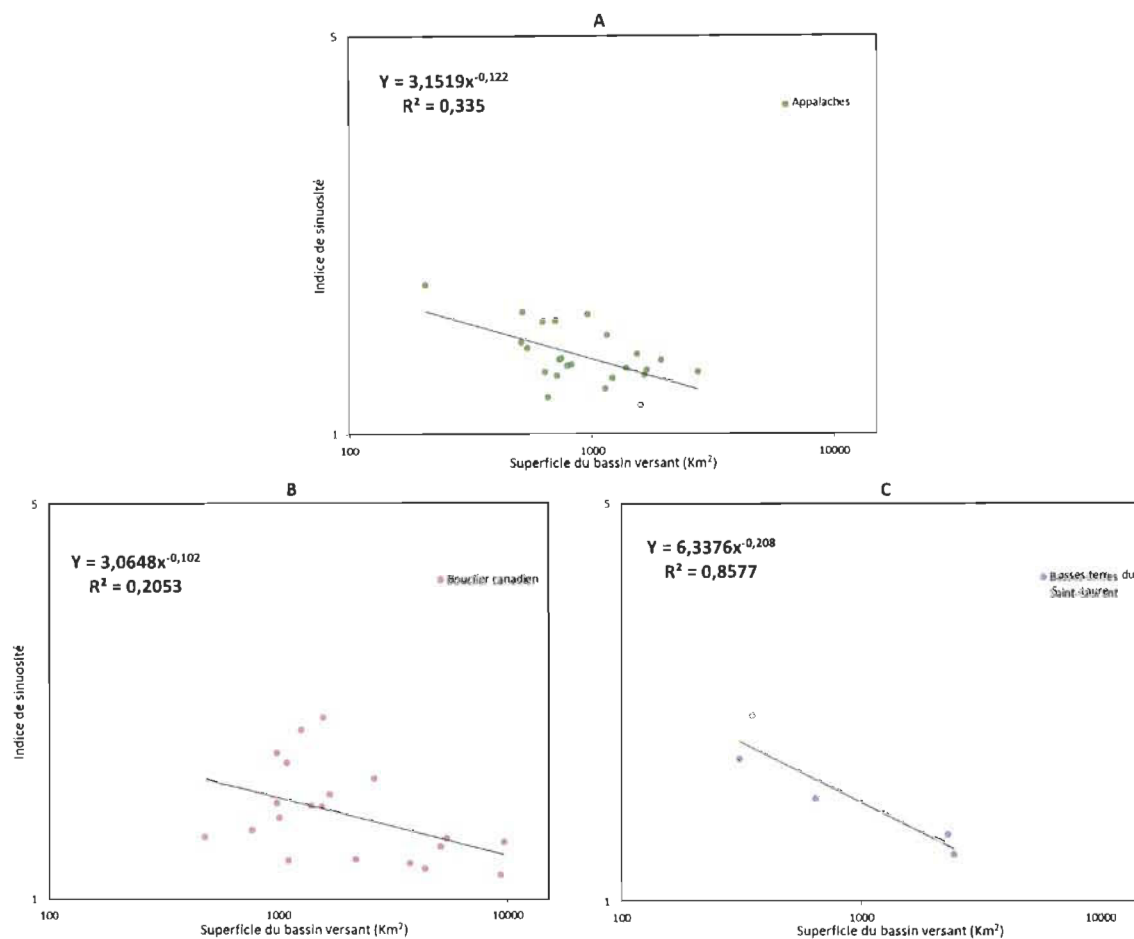
On a aussi voulu vérifier l'existence possible d'une relation puissance entre la sinuosité et les deux variables physiographiques (superficie des bassins versants et débits de récurrence de deux ans). Cette relation n'a jamais été analysée dans la littérature scientifique. Les résultats de l'analyse de cette relation sont présentés au tableau 4.5 et aux figures 4.10 à 4.13. Le lien entre la sinuosité et les deux variables peut être aussi décrit par une fonction puissance, à l'instar de celui entre ces variables et les moyennes de la largeur à plein bord. Cependant, dans le cas de la sinuosité, ce lien est beaucoup plus faible que celui qui lie la largeur à plein bord aux deux variables physiographiques.



De fait, les valeurs des coefficients de corrélation, dans le cas de la sinuosité, varient entre 21 % (Bouclier canadien) et 76 % (Basses-terres du Saint-Laurent).

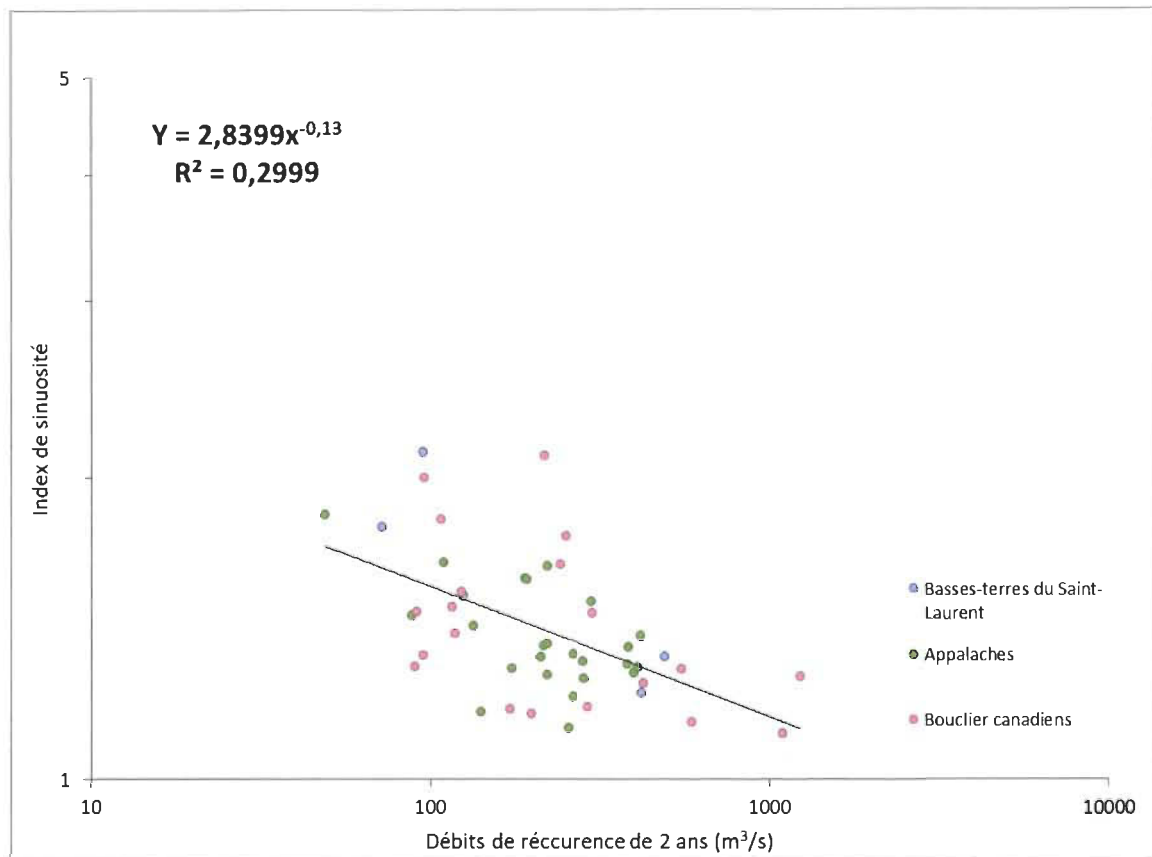


**Figure 4.10** Relation entre la superficie des bassins versants et la sinuosité dans les trois régions physiographiques.

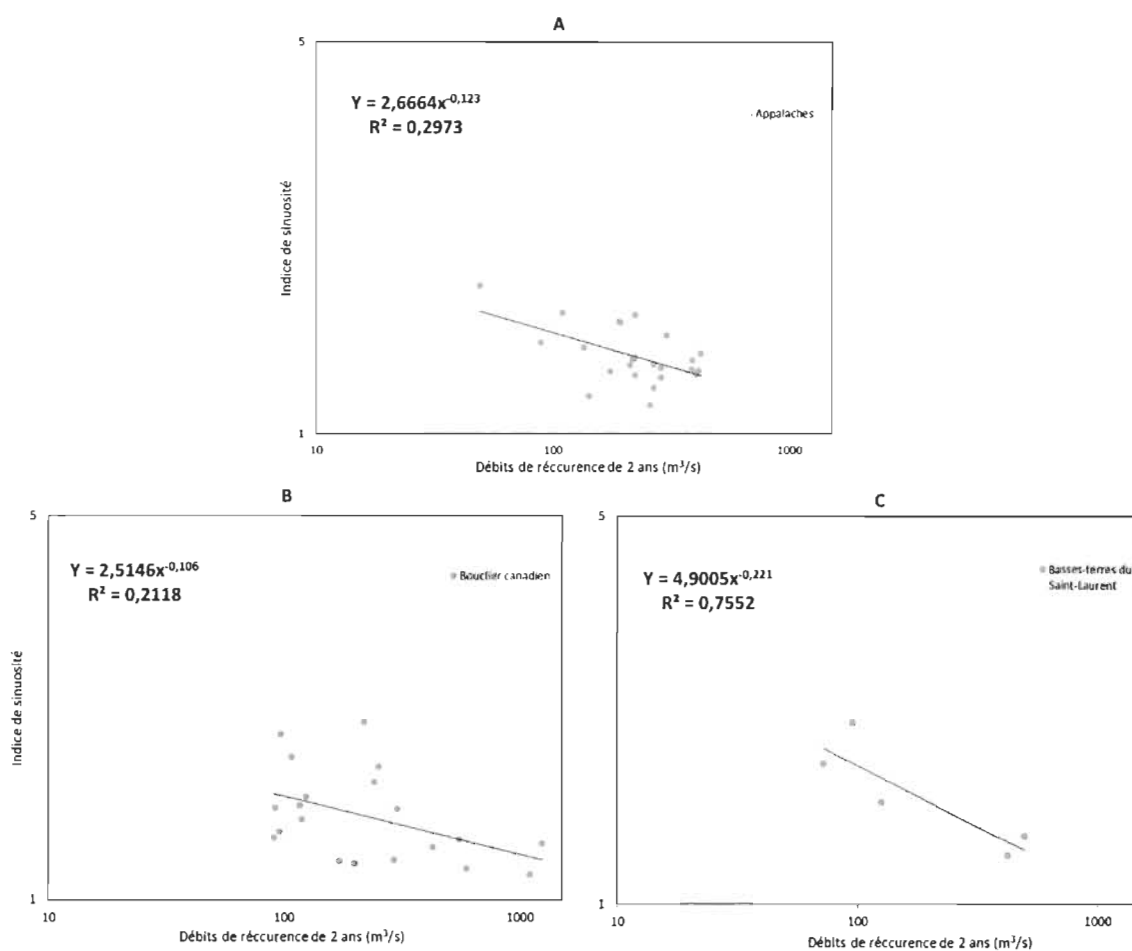


**Figure 4.11** Relation entre la superficie des bassins versants et la sinuosité pour chaque région physiographique.

A = Appalaches; B = Bouclier canadien; C = Basses-terres du Saint-Laurent.



**Figure 4.12** Relation entre les débits de récurrence de deux ans et la sinuosité dans les trois régions physiographiques.



**Figure 4.13** Relation entre le débit de récurrence de deux ans et la sinuosité dans chaque région physiographique.

A = Appalaches; B = Bouclier canadien; C = Basses-terres du Saint-Laurent.

**Tableau 4.6**

Valeurs des paramètres de la fonction puissance calculés entre la sinuosité ( $S$ ) et la superficie des bassins versants ( $S = aDA^b$ ) ainsi que la sinuosité et les débits de récurrence deux ans ( $S = aQ_2^b$ ) au Québec

	DA			Q <sub>2</sub>		
	A	b	R <sup>2</sup>	A	b	R <sup>2</sup>
Appalaches	3.15	-0.12	0.36	2.67	-0.12	0.30
Bouclier canadien	3.07	-0.10	0.21	2.52	-0.11	0.21
Basses terres	6.34	-0.21	0.86	4.9	-0.22	0.76
Québec	2.78	-0.10	0.23	2.84	-0.13	0.30

Toutes les valeurs de R<sup>2</sup> sont statistiquement significatives au seuil de 5 %. DA = superficie du bassin versant.

#### 4.5 Comparaison avec les données des autres régions du monde

On a comparé d'abord les paramètres de la fonction puissance calculés dans les différentes régions physiographiques des États-Unis (Tableau 4.6). Cette comparaison révèle qu'en ce qui concerne la superficie des bassins versants, les valeurs du paramètre  $a$  sont beaucoup plus faibles au Québec qu'aux États-Unis. En revanche, c'est l'inverse pour les valeurs de la pente  $b$ . Il importe de mentionner que les résultats observés aux États-Unis ont été calculés sur la largeur à plein bord mesurée à plusieurs stations et non sur les valeurs moyennes comme ce fut au Québec. Quant aux débits de récurrence de deux à trois ans, on observe la même tendance : les valeurs du paramètre  $a$  de la fonction puissance calculées au Québec sont plus faibles que celles calculées dans les autres régions du Canada et des autres pays alors que c'est l'inverse pour les valeurs du paramètre  $b$ .

**Tableau 4.7**

Valeurs des paramètres de la fonction puissance ( $w = aDA^b$ ) calculés entre la moyenne de la largeur à plein bord ( $w$ ) et la superficie des bassins versants ( $DA$ ) au Québec – Comparaison avec les données des États-Unis.

Pays	Régions physiographiques	Nombre de stations	Paramètres de la fonction puissance		
			a	b	R <sup>2</sup>
Québec méridional (Canada)	Les Appalaches	24	0.66	0.651	0.60
	Bouclier canadien	20	0.41	0.700	0.68
	Basses-terres du Saint-Laurent	5	0.39	0.712	0.96
	Québec	49	0.59	0.660	0.72
USA	Laurentian Upland	6	4.15	0.308	0.54
	Atlantic Plains	61	2.22	0.363	0.84
	Appalachian Highlands	377	3.12	0.416	0.87
	Interior Plain	414	2.56	0.351	0.75
	Interior Highlands	7	23.23	0.121	0.27
	Rocky Mountains	278	1.24	0.435	0.76
	Intermontane Plateau	88	1.11	0.416	0.62
	Pacific Mountains System	48	2.76	0.399	0.74
	USA	1279	2.70	0.352	0.66

**Tableau 4.8**

Valeurs des paramètres de la fonction puissance ( $w = aQ_2^b$ ) calculés entre la moyenne de la largeur à plein bord ( $w$ ) et les débits de récurrence deux ans ( $Q_2$ ) au Québec – Comparaison avec les données des autres régions

Régions physiographiques	Q	A	b
Les Appalaches (Québec)	$Q_2$	0.973	0.752
Bouclier canadien (Québec)	$Q_2$	1.692	0.721
Basses-terres du Saint-Laurent (Québec)	$Q_2$	0.816	0.784
Southern Québec	$Q_2$	1.1329	0.753
Western Canada	$Q_3$	3.26	0.50
Alberta	$Q_2$	4.79	0.53
Appalachians (USA)	$Q_{2.33}$	1.85	0.55
Britain	$Q_b$	3.67	0.35
Colorado (USA) Thick bank vegetation	$Q_b$	3.91	0.48

$Q_2$  = débit de récurrence de deux ans.  $Q_b$  = débit correspondant au débit à plein bord.

#### 4.6 Un exemple d'application de la théorie de la géométrie hydraulique : estimation des moyennes de la largeur à plein bord en aval des barrages

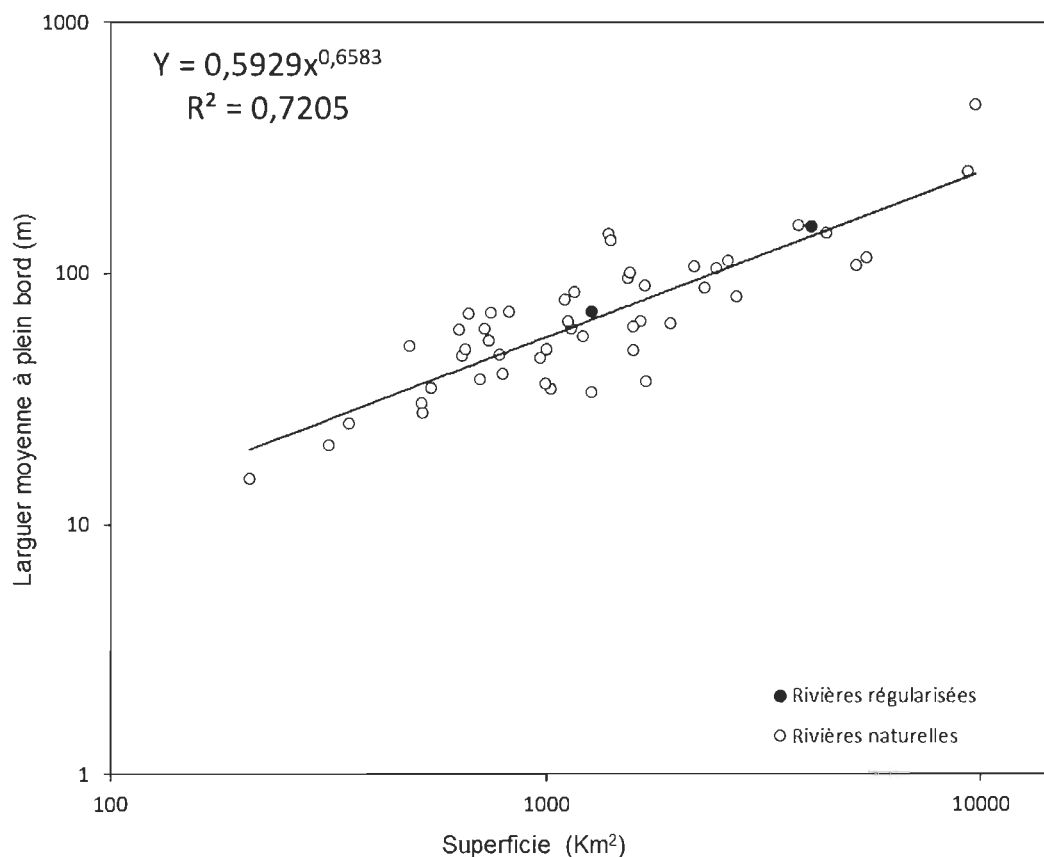
Une des applications directes de la théorie de la géométrie hydraulique est l'estimation des changements de la largeur et de la profondeur à plein bord en aval des barrages lorsqu'on ne dispose pas des mesures de ces deux variables morphologiques avant la construction de barrages. Si la largeur à plein bord d'un chenal a significativement augmenté ou diminué après la construction d'un barrage, il se produit une disproportion entre la moyenne de la largeur de ce chenal et la superficie de son bassin versant. Ainsi, sur un graphique qui représente la relation puissance entre les superficies des bassins versants naturels et les moyennes de la largeur à plein bord des rivières naturelles, les moyennes de la largeur à plein bord des rivières régularisées dont les chenaux ont connu un élargissement ou un rétrécissement s'écarteront des valeurs des moyennes de la largeur à plein bord. Cet écart pourra ainsi être quantifié pour déterminer l'impact d'un barrage sur la largeur du chenal. On a appliqué cette démarche pour déterminer les impacts du barrage Rawdon sur le chenal de la rivière Ouareau et du réservoir Taureau

sur le chenal de la rivière Matawin. Les résultats des moyennes de la largeur à plein bord mesurées et celles estimées par la fonction puissance calculée entre la superficie des bassins versants et les moyennes de la largeur à plein bord à l'échelle de tout le Québec sont consignés dans le tableau 4.9 et la figure 4.14.

**Tableau 4.9**

Comparaison des moyennes de la largeur à plein bord mesurées et estimées

	Superficie (km <sup>2</sup> )	Moyenne de la largeur à plein bord mesurée (m)	Moyenne de la largeur à plein bord estimée (m)
Matawin	4070	155	140,9
Ouareau	1270	71	65,5



**Figure 4.14** Relation entre la superficie du bassin versant et la moyenne de la largeur à plein bord des rivières naturelles et régularisées.



## 4.7 Discussion

Les travaux consacrés à la variabilité longitudinale de la largeur des chenaux dans le cadre de la théorie hydraulique ont démontré une hausse de cette largeur en fonction des débits. Néanmoins, tous ces travaux sont fondés sur des valeurs de la largeur mesurée à des stations différentes. Le principal objectif de notre travail était de vérifier si la moyenne de la largeur d'un chenal augmentait aussi de l'amont en aval en fonction des débits. L'analyse de 49 rivières du Québec méridional sur une distance de 10 km a révélé que moins de la moitié (45 %) des rivières sont caractérisées par une hausse longitudinale significative de la moyenne de la largeur à plein bord. Cette moyenne a même diminué longitudinalement pour le tiers de rivières analysées. Elle n'a pas significativement changé pour le quart des rivières. Ce résultat démontre que la variabilité longitudinale des moyennes de la largeur à plein bord ne correspond pas toujours à la théorie de la géométrie hydraulique. En d'autres termes, la moyenne de la largeur à plein bord n'augmente pas toujours longitudinalement avec celle des débits. D'autres facteurs influencent aussi cette variabilité longitudinale. Les deux facteurs les plus importants mis en évidence dans le cadre de ce travail sont sans nul doute les bancs et les îlots. De fait, la présence de ces formes morphologiques dans le bief amont entraîne une diminution significative de la moyenne de la largeur à plein bord de l'amont vers l'aval. Cependant, rappelons que d'autres auteurs ont mis en évidence l'influence d'autres nombreux facteurs sur la variabilité longitudinale de la largeur des chenaux : la végétation, la taille des sédiments des berges et du fond des lits des chenaux, la densité et la profondeur du système racinaire, le processus de gel et de dégel, des activités anthropiques (urbanisation, barrages), etc. (p. ex., Anderson et al., 2004; Bieger et al., 2015; Doll et al., 2002; Faustini et al., 2009; Morel et al., 2019; Sweeney et al., 2004; Taniguchi et Biggs, 2015).

Cependant, la variation des moyennes de la largeur à plein bord d'une rivière à une autre est fortement influencée par la superficie des bassins versants et les débits, en particulier les débits de récurrence de deux ans. En effet, l'analyse canonique de corrélation a révélé que ce sont ces deux variables qui sont les mieux corrélées positivement aux moyennes de la largeur à plein bord au Québec méridional, à l'instar des autres régions du monde. Cette corrélation a permis ainsi de calculer les relations entre les

moyennes de la largeur à plein bord et les superficies ainsi que les débits de récurrence de deux ans. Ces relations sont de type « puissance » comme le prédit la théorie de la géométrie hydraulique. La comparaison des paramètres des courbes ajustées a révélé que les valeurs de la pente (b) des courbes sont plus élevées au Québec méridional que dans les autres régions du monde. En revanche, les valeurs des ordonnées à l'origine (a) sont plus faibles que celles observées dans les autres régions. Cette différence s'expliquerait par le fait qu'au Québec, on a utilisé les valeurs moyennes de la largeur à plein bord alors qu'ailleurs, ce sont des valeurs mesurées à une seule station. À l'échelle du Québec méridional, la valeur de b varie peu dans les trois régions physiographiques contrairement à celle de a. Si l'on considère les débits de récurrence de deux ans, la valeur de a est plus élevée dans le Bouclier canadien que dans les deux autres régions physiographiques. Dans le cas de la superficie des bassins versants, la valeur la plus élevée est observée dans les Appalaches. Dans les deux cas (débits et superficie), la plus faible valeur de a est observée dans les Basses-terres du Saint-Laurent. Il s'ensuit qu'à taille égale des bassins versants, la moyenne de la largeur à plein bord est relativement plus faible dans cette dernière région que dans les deux autres en raison probablement de la faible hétérogénéité des sédiments des berges qui leur confère une certaine résistance à l'érosion.

En ce qui concerne la sinuosité, aucune différence significative des moyennes de la sinuosité ne fut observée entre les trois régions physiographiques du Québec méridional même si l'analyse canonique a révélé une corrélation entre cette variable et les caractéristiques géologiques de ces trois régions. Toutefois, une tendance à une plus forte sinuosité des chenaux a été observée dans les rivières des Basses-terres du Saint-Laurent caractérisées par des sédiments plus fins que les deux autres régions physiographiques. Mais le nombre limité de rivières analysées dans la première région n'autorise pas de tirer une conclusion définitive. Il existe aussi une relation puissance entre la sinuosité moyenne et les superficies des bassins versants ainsi que les débits de récurrence de deux ans. Mais contrairement à la largeur à plein bord, la sinuosité est faiblement corrélée à ces deux variables.

## CHAPITRE V

### CONCLUSION

À l'instar des autres régions de la planète, le Québec est de plus en plus confronté à des inondations récurrentes liées aux changements climatiques. De manière générale, les inondations résultent de l'interaction de nombreux facteurs liés au climat, aux caractéristiques physiographiques des bassins versants et aux activités anthropiques. En ce qui concerne les caractéristiques physiographiques, la morphologie des chenaux de rivières est un des principaux facteurs qui influencent l'intensité, la fréquence et la durée des inondations.

La relation entre la morphologie des chenaux et les débits de rivières a été abondamment analysée dans le cadre de la théorie de la géométrie hydraulique développée en géomorphologie fluviale au début de la décennie 1950. Selon cette théorie, la largeur et la profondeur notamment augmentent temporellement (à une station) et spatialement (longitudinalement) en fonction des débits. De nombreuses relations mathématiques ont été établies pour exprimer cette dépendance. Les applications de ces relations mathématiques sont diversifiées : dimensionnement des canaux, établissement des courbes de tarage pour estimer les débits en fonction de la variation des hauteurs d'eau à une station donnée, prévision des crues et des inondations, estimation de la qualité des habitats du poisson, détection des points de pollution, etc.

Jusqu'à présent, toutes les études consacrées à la relation entre les variables morphologiques des chenaux et les débits dans le cadre de la théorie de la géométrie hydraulique ont utilisé exclusivement les mesures « stationnelles » ou individuelles, c'est-à-dire des mesures réalisées à une ou plusieurs stations sans considérer leurs valeurs moyennes. L'objectif de notre projet d'étude était de vérifier si la théorie de la géométrie hydraulique peut s'appliquer aux moyennes des variables morphologiques, aspect qui n'avait pas encore analysé dans la littérature scientifique. Pour atteindre cet objectif,

on a donc analysé la largeur à plein bord des 49 rivières du Québec méridional sur une distance de 10 km.

En ce qui concerne la variabilité longitudinale des moyennes de la largeur à plein bord, on a observé que la théorie ne se vérifiait pas systématiquement pour toutes les rivières analysées. Seulement près de la moitié de rivières analysées (45 %) sont caractérisées par une hausse significative des moyennes de la largeur à plein bord de l'amont à l'aval sur une distance de 10 km. Pour le tiers des rivières analysées, les moyennes de leur largeur à plein bord ont même diminué longitudinalement en raison de la présence des îlots et des bancs dans les biefs amont. Quant aux relations mathématiques, il existe des relations statistiquement significatives entre ces moyennes de l'ensemble des rivières analysées ainsi que les débits et les superficies des bassins versants. Ces relations sont de forme puissance comme le prédit la théorie de la géométrie hydraulique. Néanmoins, les valeurs de pente des courbes calculées à partir des moyennes sont plus élevées que celles calculées à partir des valeurs stationnelles ou individuelles. C'est l'inverse pour les valeurs des ordonnées à l'origine. En ce qui concerne les facteurs qui influencent la variabilité longitudinale des moyennes de la largeur à plein bord, l'analyse canonique des corrélations a confirmé l'influence prépondérante des débits et des superficies des bassins versants sur cette variabilité. L'influence des autres facteurs climatiques et physiographiques est relativement mineure.

Malgré son influence sur la transmission des ondes de crues et la rugosité des lits de rivières, la sinuosité n'est pas prise en compte dans la théorie de la géométrie hydraulique. On a donc voulu vérifier aussi si cette variable morphologique se conformait à cette théorie à l'instar de la largeur et de la profondeur. Comparativement à la largeur à plein bord, la relation entre la sinuosité et les débits de rivières est relativement faible. Il s'ensuit que cette variable morphologique est très peu influencée par les débits. L'analyse canonique des corrélations a révélé que la sinuosité des rivières est principalement influencée par la lithologie.

Cette étude constitue la première étape d'analyse sur l'influence de la morphologie des chenaux sur les caractéristiques d'inondations au Québec. Pour appréhender cette influence, la seconde étape consistera à analyser les profondeurs moyennes à plein bord afin de pouvoir vérifier si ces moyennes se conforment aussi à la théorie de la géométrie hydraulique au Québec méridional. Elle permettra aussi de déterminer les facteurs qui influencent ces profondeurs. Toutefois, contrairement à la largeur des chenaux dont les données peuvent être facilement mesurées sur des photographies aériennes, les données de la profondeur à plein bord doivent obligatoirement être mesurées sur le terrain, ce qui constitue un obstacle pour l'obtention des données sur un grand nombre des rivières de taille différente. Cependant, l'utilisation des drones ouvre une perspective intéressante pour permettre d'acquérir ces données sur de nombreuses rivières. Il n'en demeure pas moins que le coût d'investissement reste élevé.

Dans le contexte actuel des changements climatiques dont les impacts se traduisent par des inondations de plus en plus fréquentes et intenses d'une part, et le besoin urgent d'une meilleure gestion des écosystèmes fluviaux pour une meilleure conservation de leur intégrité écologique d'autre part, il semble impératif d'analyser en profondeur les impacts de la morphologie des chenaux sur ces inondations dans le cadre de la théorie de la géométrie hydraulique au Québec. Cette théorie y contribuera ainsi à une meilleure compréhension des processus fluviaux pour une meilleure gestion des écosystèmes aquatiques.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Afifi, A.A., Clark, V. 1996. *Computer-Aided Multivariate Analysis*, 3rd edn., Chapman and Hall: New York; 505.
- Alobaidi, M.H., Marpu, P.R., Ouarda, T.B.M.J., Chebana F. 2016. Regional frequency analysis at ungauged sites using a two-stage resampling generalized ensemble framework. *Advances in Water Resources*, 84, 103-111.
- Alibert, M., Assani, A.A., Gratton, D., Leroux, D., Laurencelle, M. 2011. Statistical analysis of the evolution of a semialluvial stream channel upstream from an inversion-type reservoir: The case of the Matawin river (Quebec, Canada). *Geomorphology*, 131, 28-34.
- Allmendinger, N.E., Pizzuto, J.E., Potter, N, et al. 2005. The influence of riparian vegetation on stream width, eastern Pennsylvania, USA. *Geological Society of America Bulletin*, 117, 229-243.
- Anctil, F., Martel, N., and Hoang, V.D. 1998. Analyse régionale des crues journalières de la province de Québec. *Canadian Journal Civil Engineering*, 25, 360-369.
- Anctil, F., and Mathevet, T. 2004. Influence de la taille des régions homogènes sur la qualité de l'ajustement des crues de rivières non jaugées au Québec. *Canadian Water Resources Journal*, 29, 47-58.
- Anderson, R.J., Bledsoe, B.R., Hession, W.C. 2004. Width of streams and rivers in response to vegetation, bank material, and other factors. *Journal of American Water Resources Association*, 40, 1159-1172.
- Arrington, T., James, L.A. 2013. Downstream geomorphic variation and local bedrock influence of a steep transitional river: Blue Ridge to Piedmont, South Carolina, *Physical Geography*, 34, 373-391.
- Assani, A.A. 2016. The usefulness of the Lombard method for analyzing the hydrological impacts of dams: the case of the Manouane River diversion dam, Quebec, Canada. *Water*, 8, 410, doi: 10.3390/w8090410.
- Assani A. A. 2017. Analysis of the influence of the 2007-2008 La Nina events, land use, and dam management modes on the 2008 spring freshet characteristics in Quebec, Canada. In: *Flood risk Management*, T. Hromadka, P. Rao (eds). Intech, chap. 10, 205-219.

- Assani, A.A., Buffin-Bélanger, T., and Roy, A.G. 2002. Analyse d'impacts d'un barrage sur le regime hydrologique de la Rivière-Matawin (Québec, Canada). *Revue de Sciences de l'Eau*, 15, 557-574.
- Assani, A.A., Tardif, S. 2005. Classification, caractérisation et facteurs de variabilité spatiale des régimes hydrologiques naturels au Québec (Canada). Approche éco-géographique. *Revue des Sciences de l'Eau*, 18, 247-266.
- Assani, A.A., Stichelbout, É., Roy, A.G., Petit, F. 2006. Comparison of impacts of dams on the annual maximum flow characteristics in three regulated hydrologic regimes in Québec (Canada). *Hydrological Processes*, 20, 3485-3501.
- Assani, A.A., Charron, S., Matteau, M., Mesfioui, M., and Quessy, J.-F. 2010. Temporal variability modes of floods for catchments in the St. Lawrence watershed (Quebec, Canada). *Journal of Hydrology*, 385, 292-299.
- Assani, A.A., Landry, R., François, J.-F., and Francis, C. 2011. Temporal variability of rain-induced floods in Southern Quebec. In J. Blanco & H. Kheradmand (Eds): *Climate change. Geophysical foundations and ecological effects*, INTECH, Rijeka, Croatia, pp 65-80.
- Assani, A.A., Landry, R., Labrèche, M., Frenette, J.-J., and Gratton, D. 2014a. Temporal variability of monthly daily extreme water levels in the St. Lawrence River at the Sorel station from 1912 to 2010. *Water*, 6, 196-212.
- Assani, A.A., Landry, R., Stacey, B., and Frenette, J.-J. 2014b. Analysis of the interannual variability of annual daily extreme water levels in the St Lawrence River and Lake Ontario from 1918 to 2010. *Hydrological Processes*, 28, 4011-4022.
- Assani, A.A., Landry, R., Kinnard, C., Azouaoui, O., Demers, C., and Lacasse, K. 2016. Comparison of the spatiotemporal variability of temperature, precipitation, and maximum daily spring flows in two watersheds in Quebec characterized by different land use. *Advances in Meteorology*, 2016, article ID: 3746460, 1-8.
- Aubry, L., Assani, A.A., Biron, S., Gratton, D. 2013. Comparison of the hydromorphological of the the L'Assomption and Ouareau river channels (Quebec, Canada). *River Research and Applications*, 29, 979-990.
- Autumn, L., Springer, G.S. 2006. Channel geometry, median grain size, and stream power in small mountain streams. *Geomorphology*, 78, 64-76.
- Beauchamp, M., Assani, A.A., Landry, R., and Massicotte, P. 2015. Temporal variability of the magnitude and timing of winter maximum daily flows in Southern Quebec (Canada). *Journal of Hydrology*, 529, 410-417.

- Ben Aissia, M.-A., Chebana, F., Ouarda, T.B.M.J., Roy, L., Desrochers, G., Chartier, I., and Robichaud, É. 2012. Multivariate analysis of flood characteristics in a climate change context of the watershed of the Baskatong reservoir, Province of Québec, Canada. *Hydrological Processes*, 26, 130-142.
- Ben Aissia, M.-A., Chebana, F., Ouarda, T.B.M.J., Burneau, P., and Barber, M. 2015. Bivariate index-flood model: case study in Québec, Canada. *Hydrological Science Journal*, 60, 247-268.
- Belzile, L., Bérubé, P., Hoang, V.D., Leclerc, M., 1997. *Méthode écohydrologique de détermination des débits réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec*. Report submitted by INRS-Eau and Groupe-conseil Génivar inc. to the Ministère de l'Environnement et de la Faune and Fisheries and Oceans Canada. 83 p + 8 annexes.
- Bieger, K., Rathjens, H., Allen, P.M., Arnold, J.G. 2015. Development and evaluation of bankfull hydraulic geometry relationships for the physiographic regions of the United States. *Journal of the American Water Resources Association*, 15, 1-17, doi: 10.1111/jawr.12282.
- Biron P.M., Morneau F. 2014. L'hydrogéomorphologie appliquée à la gestion de l'aléa d'inondation en climat tempéré froid : l'exemple de la rivière Matane (Québec). *Physio-Géo*, 8, 67-88.
- Buffin-Bélanger, T., Héту, B. 2008. Les risques d'inondation sur les cones alluviaux dans l'est du Québec. Comptes Rendus de la 4e Conférence canadienne sur les géorisques: des causes à la gestion. Presse de l'Université Laval, 8 p.
- Buffin-Bélanger, T., Demers, S., Montané, A. 2017. Hydrogeomorphology and the flood phenomenon. Floods: Volume 1 - *Risk Knowledge*. F. Vinet. doi: 10.1016/B978-1-78548-268-7.50010-9.
- Buttle, J.M., Allen, D.M., Caissie, D., Davison, B., Hayashi, M., Peters, D.L., Pomeroy, J.W., Simonovic S., and St-Hilaire A., Whitfield P.H. 2016. Flood processes in Canada: Regional and special aspects. *Canadian Water Resources Journal*, 41, 7-30.
- Castro, J.M., Jackson, P.L. 2001. Bankfull discharge recurrence intervals and regional hydraulic geometry relationships: patterns in the Pacific North West, USA. *Journal of the American Water Resources Association*, 37, 1249-1262.
- Chebana, F., Charron, C., Ouarda, T.B.M.J., and Martel, B. 2014. Regional frequency analysis at ungauged sites with the Generalized Additive Model. *Journal of Hydrometeorology*, 15, 2418-2428.



- Daviau, J.L., Adamowski, K., and Patry G.G. 2000. Regional flood frequency analysis using GIS, L-moment and geostatistical methods. *Hydrological Processes*, 14, 2731-2753.
- Demers, S., Olsen, T., Buffin-Bélanger, T., Marchand, J.P., Biron, P.M., Morneau, F. 2014. L'hydrogéomorphologie appliquée à la gestion de l'aléa d'inondation en climat tempéré froid : l'exemple de la rivière Matane (Québec). *Physio-Géo*, 8, 67-88.
- Dingman, S.L. 2007. Analytical derivation of at-station- hydraulic-geometry in step headwater streams, Colorado, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 1820-1837.
- Dingman, S.L., Afshari, S. 2018. Field verification of analytical at-a-station hydraulic-geometry relations. *Journal of Hydrology*, 564, 859-872.
- Doll, B.A., Wise-Frederick, D.E., Buckner, C.M., Wilkerson, S.D., Harman, W.A., Smith, R.E., Spooner, J. 2002. Hydraulic geometry relationships for urban streams throughout the Piedmont of North Carolina. *Journal of the American Water Resources Association*, 38, 641-651.
- Durocher, M., Chebana F., and Ouarda, T.B.M.J. 2016a. Delineation of homogenous regions using hydrological variables predicted by projection pursuit regression. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 20, 4717-4729.
- Durocher, M., Chebana, F., and Ouarda T.B.M.J. 2016b. On the prediction of extreme flood quantiles at ungauged locations with spatial copula. *Journal of Hydrology*, 533, 523-532.
- Ferguson, R.I. 1986. Hydraulics and hydraulic geometry. *Progress in Physical Geography*, 10, 1-31.
- Faustini, J.M, Kaufmann, P.R., Herlihy, A.T. 2009. Downstream variation in bankfull width of wadeable streams across the conterminous United States. *Geomorphology*, 108, 292-311.
- Gleason, C.J. 2015. Hydraulic geometry of natural rivers: a review and future. *Progress in Physical Geography*, 39, 337-360.
- Gleason, C.J., Wang, J. 2015. Theretical basis for at-many-station hydraulic geometry. *Geophysical Research Letters*, 42, 7107-7114, doi: 10.1002/2015GL064935.
- Grehys. (1996). Presentation and review of some methods for regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 186, 63-84.

- Haché, M., Ouarda, T.B.M.J., Bruneau P., and Bobée, B. 2002. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29, 899-910.  
<https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/les-grands-ensembles-geologiques-du-quebec>
- Huang, H.Q., Nanson, G.C. 1997. Vegetation and channel variation: a case study of four small in southeastern Australia. *Geomorphology*, 18, 237-249.
- Huang, H.Q., Nanson, G.C. 1998. The influence of bank strenght on channel geometry: an integrated analysis of some observations. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 865-876.
- Jackson, C.R., Leigh, D.S., Scarbrough, S.L., Chamblee, J.F. 2014. Herbaceous versus forested riparian vegetation: narrow and simple versus wide, woody and diverse stream habitat. *River Research and Applications*, 31, 847-857.
- Jewell, S., Kimball, S.M. 2013. Equations for estimating bankfull channel geometry and discharge for stream in Massachusetts. U.S. Geological Survey, Report 5155, 46 p + Annexes.
- Julien, P.Y. 2014. Downstream hydraulic geometry of alluvial rivers. Proceedings of symposium on sediment dynamics from the summit to the sea, New Orleans, IHAS Publ 367, 3-6.
- Knighton, D. 1998. *Fluvial forms & process. A new perspective*. Arnold, John Wiley & Sons Inc., New York, 383 p.
- Lacey, G. 1930. Stable channels in alluvium. *Proceedings of the Institute of Civil Enginners*, London, 229, 259-292.
- Landry, R., Assani, A.A., Biron, S., and Quessy, J.-F. 2014. The management modes of seasonal floods and their impact on the relationship between climate and streamflow downstream from dams in Quebec (Canada). *River Research and Applications*, 30, 287-298.
- Lavigne, M.-P.; Rousseau, A.N.; Turcotte, R.; Laroche, A.-M.; Fortin, J.-P.; Villeneuve, J.-P. 2004. Validation and use of a semidistributed hydrological modelling system to predict short-term effects of clear-cutting on a watershed hydrological regime. *Earth Inter*, 8, 1-19.
- Lawlor, S.M. 2004. Determination of channel-morphology characteristics, bankfull discharge, and various design-peak discharges in Western Montana. U.S. Geological Survey, Report 5263, 13 p + 19 tables.

- Lazarus, E.D., and Constantine, J.A. Generic theory for channel sinuosity. *PNAS*, 110, 8447-8452.
- Leclerc, M., and Ouarda, T.B.M.J. 2007. Non-stationary regional flood frequency analysis at ungauged sites. *Journal of Hydrology*, 343, 254-265.
- Leigh, D.S. 2010. Morphology and channel evolution of small streams in the Southern Blue Ridge Mountains of Western North Carolina. *Southeastern Geographer*, 50, 397-421.
- Leopold, L.B., Maddock, T. 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. USG Professional Paper 252.
- Mazouz, R., Assani, A.A., Quessy, J.-F., and Légaré G. 2012. Comparison of the interannual variability of spring heavy floods characteristics of tributaries of the St. Lawrence River in Quebec (Canada). *Advances in Water Resources*, 35, 110-120.
- Mazouz, R., Assani, A.A., and Rodriguez, M. 2013. Application of redundancy analysis to hydroclimatology: A case of spring heavy floods in Southern Québec (Canada). *Journal of Hydrology*, 496, 187-194.
- Merritt, D.M., Wohl, E.E. 2003. Downstream hydraulic geometry and channel adjustment during a flood along an ephemeral, arid-region drainage. *Geomorphology*, 52, 165-180.
- Muma, M., Assani, A.A., Landry, R., Quessy, J.-F., and Mesfioui, M. 2011. Effects of the change from forest to agriculture land use on the spatial variability of summer extreme daily flow characteristics in Southern Quebec (Canada). *Journal of Hydrology*, 407, 153-163.
- Orlandini, S., Rosso, R. 1998. Parametrization of stream channel geometry in the distributed modeling of catchment dynamics. *Water Resources Research*, 34, 1971-1985.
- Organisation de la Sécurité Civile du Québec (OSCQ). 2008. *Gaspé 2007 : "une nouvelle expérience, une nouvelle référence"*. Rapport d'événement. Direction générale de la sécurité civile et de la sécurité incendie. Québec, 14 p.
- Ouarda, T.B.M.J, Lang, M., Bobée, B., Bernier, J., and Bois, P. 1999a. Synthèse de modèles régionaux d'estimation de crue utilisés en France et au Québec. *Revue des Sciences de l'Eau*, 12, 155-182.

- Ouarda, T.B.M.J., Rasmussen, P.F., Cantin, J.-F., Bobée, B., Laurence R., Hoang, V.D., and Barabé, G. 1999b. identification d'un réseau hydrométrique pour le suivi des modifications climatiques dans la province de Québec. *Revue des Sciences de l'Eau*, 12, 425-448.
- Ouarda, T.B.M.J., Girard, C., Cavadias, G.S., and Bobée, B. 2001. Regional flood frequency estimation with canonical correlation analysis. *Journal of Hydrology*, 254, 157-173.
- Pandey, G.R., and Nguyen, V.-T.-V. 1999. A comparative study of regression based methods in regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 225, 92-101.
- Park, C.C. 1977. World-wide variations in hydraulic geometry exponents of stream channels; analysis and some observations. *Journal of Hydrology*, 33, 133-146.
- Petit, F., Daxhelet, C. 1989. Détermination du débit à plein bords et de sa recurrence dans différentes rivières de moyenne et haute Belgique. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 25, 69-54.
- Poff NL, Blesdoe BP, Cuhaciyan CO. 2006. Hydrologic variation with land use across the contiguous United States: geomorphic and ecological consequences for stream ecosystems. *Geomorphology*, 79, 264-285.
- Quilbé, R.; Rousseau, A.N.; Moquet, J.-S., Savary, S., Ricard, S.; Garbouj, M.S. Hydrological responses of a watershed to historical land use evolution and future land use scenarios under climate change conditions. *Hydrology & Earth Systems Sciences*, 2008, 12, 101-110.
- Reinfields, I. 1997. Reconstruction of surveyed cross-sections and aerial photography. *Applied Geography*, 17, 203-213.
- Rhodes, D.D. 1987. The B-F-M diagram for downstream hydraulic geometry. *Geografiska Annaler Series a-Physical Geography*, 69, 147-161.
- Ribeiro-Corréa, J., Cavadias, G.S., Clément, B., and Rousselle, J. 1995. Identification of hydrological neighborhoods using canonical correlations analysis. *Journal of Hydrology*, 173, 71-89.
- Richards, K.S. 1973. Hydraulic geometry and channel roughness: nonlinear system. *American Journal of Science*, 273, 877-896.

- Rosenfeld, J.S., Post, J., Robins, G., Hatfield, T. 2006. Hydraulic geometry as a physical template for the river continuum: application to optimal flows and longitudinal trends in salmonid habitat. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 64, 755-767.
- Roy, L., Leconte, R., Brissette, F.P., Marche, C., 2001. The impact of climate change on seasonal floods of a southern Quebec River Basin. *Hydrological Processes*, 15, 316-3179.
- Saad C., S. El Adlouni, A. St-Hilaire, P. Gachon. 2014. A nested multivariate copula approach to hydrometeorological simulations of spring floods: The case of the Richelieu River (Québec, Canada) record flood. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 29, 1-20.
- Saad C., St-Hilaire A., Gachon P., El Adlouni S. 2016. The 2011 flood event in the Richelieu River basin: causes, assessment and damages. *Canadian Water Resources Journal*, 41, 129-138.
- Savenije, H.H.G. 2003. The width of a bankfull channel; Lacey's formula explained. *Journal of Hydrology*, 276, 176-183.
- Schumm, S. A. 1969. River metamorphosis. *Journal of the Hydraulics division*, 95(1), 255-274.
- Schumm S. A. 1977. *The Fluvial System*: New York, John Wiley, 338 p.
- Shu, C., Ourda, T.B.M.J. 2008. Regional flood frequency analysis at ungauged sites using the adaptive neuro-fuzzy inference system. *Journal of Hydrology*, 349, 31-43.
- Singh, V.P. 2003. On the theories of hydraulic geometry. *International Journal Sedimentary Research*, 18, 196-218.
- Singh, V.P., Zhang, L. 2008. At-a-station hydraulic geometry relations, 1: theoretical development. *Hydrological Processes*, 22, 189-215.
- St-Hilaire, A., Duchesne, S., and Rousseau A.N. 2006. Floods and water quality in Canada: A review of the interactions with urbanization, agriculture and forestry. *Canadian Water Resources Journal*, 41, 273-287.
- Sweeney, B.W., Bott, T.L., Jackson, J.K., Kaplan, L.A., Newbold, J.D., Standley, L.J., Hession, W.C., Horwitz, R.J. 2004. Riparian deforestation, stream narrowing, and loss of stream ecosystems services. *Proceedings of National American Science*, 101, 14132-14137.

- Taniguchi, K.T., Biggs, T.W. 2015. Regional impacts of urbanization on stream channel geometry: a case study in semiarid southern California. *Geomorphology*, 248, 228-236.
- Tinkler, K.J., Pengelly, J.W. 1995. Great Lakes response to catastrophic: some simulations of hydraulic geometry for chained lake systems. *Journal of Paleolimnology*, 13, 251-266.
- Tremblay E. 2005. 1996: Deluge au Saguenay-Lac-Saint-Jean. *Cap-aux-Diamants*, 82, 44-47.
- Vadnais, ME, Assani, A.A., Landry, R., Leroux, D., Gratton, D. 2012. Analysis of the effects of human activities on the hydromorphological evolution channel of the Saint-Maurice River downstream from La Gabelle dam (Quebec, Canada). *Geomorphology*, 175-176, 199-208.
- Wazneh, H., Chebana, F., and Ouarda, T.B.M.J. 2016. Identification of hydrological neighborhoods for regional flood frequency analysis using statistical depth function. *Advances in Water Resources*, 94, 251-263.
- Xu, J.X. 2004. Comparison of hydraulic geometry between sand- and gravel-bed rivers in relation to channel pattern discrimination. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 645-657.